Comment le déterminisme régit toutes les lois de la physique

Philosophie des sciences

**« Il y a quatre déterminismes opposés du hasard :
un causal et trois sans cause. »**

Daniel Martin

Objectif philosophique de ce livre

La Philosophie des sciences s’intéresse à l’ensemble des doctrines, principes et règles structurant les lois et la pensée scientifiques. Le principal point commun de ces préceptes est la causalité, appliquée par le déterminisme. Ce livre en présente 171.

Beaucoup de gens croient que l'adjectif *déterministe* qualifie une causalité qui entraîne l'unicité du résultat d'une loi d'évolution de la nature. Leur erreur vient d'une compréhension insuffisante des notions de causalité, de déterminisme et de hasard.

Ce texte montre que la causalité des lois naturelles, par exemple en physique quantique, conduit souvent l'évolution d'une situation donnée à des résultats multiples, qui coexistent tant que l'un d'eux n'a pas été choisi. En général, ce choix résulte d'une brutale interférence du monde macroscopique avec l'état du système à l'échelle atomique en fin d'évolution, par exemple lors d'une mesure.

Il y a un déterminisme causal rigoureux des cas de multiplicité, et il généralise celui, restreint, des cas de résultat unique. Il y a aussi trois déterminismes non causaux, qui ne relèvent pas, non plus, du hasard.

Compris correctement, le hasard n'intervient jamais dans une loi de la nature. Des résultats multiples prennent la forme de distributions statistiques prédéterminées. Le hasard n'y existe que dans les choix de résultat, effectués indépendamment de la cause du phénomène dont les variables sont distribuées. On l'invoque souvent au lieu d'admettre l’ignorance.

C'est l'homme qui écrit les lois de la physique, et il en exclut deux causes particulières : le hasard et Dieu.

Voilà ce que ce livre explique concernant le déterminisme, dont il approfondit les règles d'application aux divers types de lois physiques.

Présentation de l'ouvrage

Mise à jour : 20/08/2022

Ce texte est extrait de l'ouvrage *Déterminisme, chaos et cosmologie relativiste - Philosophie des sciences et vulgarisation*. On y trouvera les définitions précises des termes philosophiques et techniques utilisés, ainsi que des compléments d'explications et des références bibliographiques.

Les philosophes connaissent tous la définition traditionnelle du déterminisme, issue de l'*Essai philosophique sur les probabilités* de Laplace, publié en 1814, qui dit en substance : "*Est déterministe toute évolution de système qui ne dépend que des circonstances initiales et obéit à une loi*". En l'écrivant, l'astronome Laplace avait en tête le mouvement des planètes, parfaitement régulier et régi par les lois de Newton.

Par induction, Laplace étendait cette loi à tout système matériel de l'Univers. Il en déduisait alors qu'une intelligence connaissant parfaitement les circonstances d'un système à l'instant *t* pourrait prédire son évolution future et reconstituer mentalement son évolution passée aussi loin qu'elle voulait.

Hélas, cette loi est fausse en dehors de l'échelle macroscopique, nous en verrons plusieurs exemples, mais les philosophes traditionnels n'en tiennent pas compte. Ils se contentent d'affirmer que certains phénomènes, par exemple en physique des particules, ne sont pas déterministes parce que leurs évolutions ont des résultats multiples et probabilistes.

Ce livre reprend donc la définition du déterminisme à sa base métaphysique, la causalité, pour montrer comment une définition basée sur la réalité empirique de la physique montre que *toutes* ses lois sont déterministes – sauf celles où intervient une dissipation d'énergie comme un frottement, impossible à décrire avec précision.

L'ouvrage approfondit alors la définition du déterminisme, en décrivant ses limites, son opposé *le hasard*, ainsi que les extensions permettant de régir la Mécanique quantique et les phénomènes naturels de complexité quelconque.

Après une étude détaillée de la causalité, il montre comment les théories actuelles de la psychologie cognitive (le modèle informatique du psychisme) justifient les doctrines rationalistes, notamment le rationalisme critique de Karl Popper et l'abandon des croyances en une nécessaire transcendance de l'esprit.

Après des études d'ingénieur et d'astronomie suivies de cinq années d'enseignement-recherche, Daniel Martin a fait une carrière internationale d'informaticien spécialiste des bases de données. Il se consacre depuis 13 ans à la Philosophie des sciences.

Table des matières

1 Origine historique : le Déterminisme philosophique

Dans son monumental ouvrage *Traité de mécanique céleste*, publié en 5 volumes de 1798 à 1827, Laplace démontrait les lois détaillées du mouvement des planètes à partir des lois de Newton. Ces corps célestes se déplaçaient avec une régularité remarquable : on pouvait prévoir la position de chacun des années à l'avance, et retrouver celle qu'ils avaient à une date lointaine du passé. Laplace a donc naturellement postulé que toutes les lois de la nature avaient les mêmes qualités :

- Universalité : elles s'appliquent à tous les corps, en toutes circonstances et en tous lieux ;
- Stabilité : elles n'ont pas varié depuis l'aube des temps et resteront valables indéfiniment.

Ces qualités sont à l'origine de la doctrine du déterminisme, voici comment.

Dans l'*Essai philosophique sur les probabilités* de Laplace on lit, page 3 :
"Les événements actuels ont, avec les précédents, une liaison fondée sur le principe évident, qu'une chose ne peut pas commencer d'être, sans une cause qui la produise. Cet axiome, connu sous le nom de *Principe de la raison suffisante*, s'étend aux actions mêmes que l'on juge indifférentes. La volonté la plus libre ne peut sans un motif déterminant, leur donner naissance ; […] L'opinion contraire est une illusion de l'esprit qui, perdant de vue les raisons fugitives du choix de la volonté dans les choses indifférentes, se persuade qu'elle s'est déterminée d'elle-même et sans motifs."

Interprétation

- L'existence d'une chose ou la survenance d'un événement sont dus à une cause : ils ne sont pas l'effet du hasard.
- Même lorsque cette cause est la volonté d'un être, celui-ci a eu une raison d'agir. L'existence de décisions prises sans émotion ni contrainte [comme dans un calcul scientifique] ne justifie pas de croire qu'il existe une pensée indépendante de la matière. [Athée, Laplace militait contre les croyances en Dieu, en une âme immortelle, etc.]
- L'enchaînement d'événements par causalité est une loi de la nature. Aucune volonté ne peut remplacer cette causalité naturelle, quel que soit son libre arbitre, sans passer par une cause suffisante naturelle ; la volonté d'un esprit ne peut donc pas agir physiquement.
- La liberté d'action physique indépendante des lois naturelles est une illusion, une telle liberté n'existant que dans la possibilité de penser.

Déterminisme philosophique

Dans ce texte de 1814, l'astronome et mathématicien Laplace affirme le déterminisme sans utiliser ce terme ; c'est parce qu'il parle de « motif déterminant » que sa doctrine a reçu le nom de *déterminisme*. D'après cette doctrine, appelée *Déterminisme philosophique* :

> **« Rien ne peut exister sans cause : une cause précède nécessairement toute existence de chose ; et elle suffit, lorsqu'elle existe, pour que la chose soit ou apparaisse. »**

Laplace était athée, sa doctrine est matérialiste. Pour lui, l'existence d'une chose n'est jamais due à une volonté transcendante, sa cause est toujours naturelle.

Laplace écrit à la suite de la citation précédente :
"Nous devons donc envisager l'état présent de l'Univers comme l'effet de son état antérieur et comme la cause de celui qui va suivre. Une intelligence [le « démon » de Laplace] qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée, et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'Univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir comme le passé, serait présent à ses yeux. L'esprit humain offre, dans la perfection qu'il a su donner à l'Astronomie, une faible esquisse de cette intelligence. Ses découvertes en Mécanique et en Géométrie, jointes à celle de la pesanteur universelle, l'ont mis à portée de comprendre dans les mêmes expressions analytiques les états passés et futurs du système du monde."

Selon le Déterminisme philosophique :

- Les causes successives provoquent l'enchaînement des états d'un système qui évolue, ces états successifs formant une *chaîne de causalité*.
- La science humaine doit permettre d'expliquer l'état présent d'un système en reconstituant par la pensée l'historique complet des évolutions dont il résulte, conformément aux lois physiques. Cela implique la possibilité pour l'homme de comprendre tous les phénomènes dont il connaît les causes successives, *promesse d'intelligibilité des phénomènes* et de *pouvoir explicatif de la science* ;
- Les lois de la science doivent aussi permettre de prévoir les évolutions futures et de prédire les situations correspondantes, *promesse de prévisibilité*.

1.1 Le Déterminisme philosophique ne tient pas toujours ses promesses

La radioactivité naturelle est un exemple de phénomène qui échappe au Déterminisme philosophique. Quand les atomes d'un échantillon d'uranium 238 se décomposent spontanément un par un en produisant des atomes de thorium et d'hélium :

- il est impossible de savoir quel est le premier atome de l'échantillon qui se décomposera, et à quelle heure ;
- dans un échantillon d'uranium contenant des atomes de thorium, résultant de telles décompositions, on ne peut retrouver dans quel ordre ces atomes de thorium sont apparus ;
- les décompositions se produisent toutes sans cause apparente, à des instants imprévisibles.

Ces impossibilités (qui se démontrent) contredisent le Déterminisme philosophique, qu'il faut donc abandonner car les lois et principes de la physique ne doivent pas avoir d'exception. Daniel Martin a donc construit une autre théorie du déterminisme des lois physiques d'évolution capable de les régir toutes ; nous allons la découvrir par étapes en commençant par la compréhension de la radioactivité naturelle.

Le problème du Déterminisme philosophique est qu'il ne peut ni prédire une situation future (par exemple quel est le premier atome qui se décomposera, et à quelle heure), ni reconstituer en pensée l'ordre de décomposition des atomes d'uranium. La décomposition radioactive naturelle est pourtant régie par une loi, que Laplace ne pouvait pas connaître à son époque, voici laquelle.

2 Radioactivité naturelle

Décomposition radioactive, découverte par Henri Becquerel en 1896

Un morceau de corps radioactif comme l'uranium 238 (noté ^{238}U) se décompose spontanément : de temps en temps un de ses atomes se brise en deux atomes : du thorium 234 (^{234}Th) et de l'hélium 4 (^{4}He), ce qu'on note : $^{238}U \rightarrow {}^{234}Th + {}^{4}He$.

Demi-vie

La loi qui décrit la décomposition d'un échantillon d'uranium ne donne qu'une *période de demi-vie*, durée au bout de laquelle 50% des atomes de son ^{238}U se seront décomposés ; et cette durée de demi-vie n'est qu'une moyenne statistique, vraie pour un nombre significatif d'échantillons. La demi-vie de ^{238}U est 4.5 milliards d'années : un échantillon paraît donc très stable ; il se décompose pourtant spontanément, atome par atome.

Si un atome d'un échantillon observé de ^{238}U est du ^{234}Th, il s'est certainement formé lors de la décomposition d'un atome ^{238}U, mais il ne peut exister de loi pour savoir à quelle date. Insistons : ce n'est pas qu'on ne connaît pas de « loi de date de la prochaine décomposition naturelle d'un atome de ^{238}U », c'est qu'*il ne peut y avoir une telle loi au niveau d'un atome pour cette décomposition, la loi de décomposition étant au niveau d'une population d'atomes*.

Une limite du Déterminisme philosophique

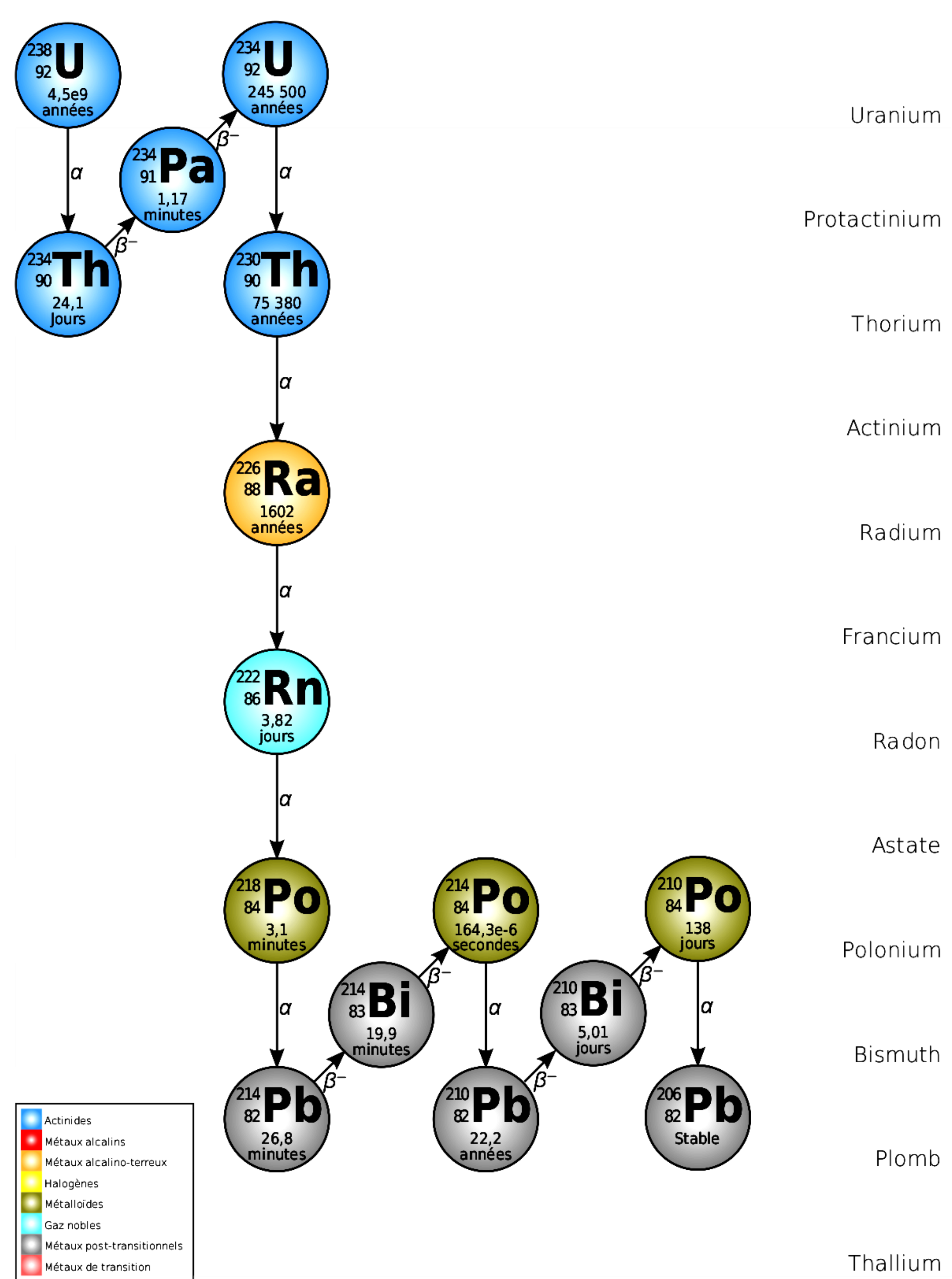
Nous avons là une limite du Déterminisme philosophique : certains phénomènes naturels sont bien régis par des lois d'évolution, mais celles-ci ne prédisent pas une solution unique comme la connaissance de la date d'une décomposition particulière. La loi d'évolution à un instant donné a des résultats multiples distribués statistiquement, pas un résultat unique.

D'où les conclusions métaphysiques :

> **« Une loi d'évolution peut ne pas ne pas avoir de résultat unique, mais des résultats multiples distribués statistiquement. »**
> (Une loi d'évolution statistique relève du cas important du *Déterminisme sans cause*.)
>
> **« Ce n'est pas parce que l'esprit humain distingue une partie d'un objet (ici des atomes individuels) que la loi d'évolution naturelle agit au niveau de cette partie. »**
>
> **« Un changement d'état d'un objet (comme une décomposition) peut se produire sans échange d'énergie avec l'extérieur. Il résulte alors de causes internes, souvent regroupées sous le nom d'instabilité. »**

Nous verrons plus bas qu'il y a d'autres lois d'évolution déterministes qui ont une portée globale. Nous verrons aussi d'autres évolutions sans cause extérieure. Nous verrons enfin quelle loi globale décrit la radioactivité naturelle.

En résume : le phénomène de décomposition radioactive d'un atome d'uranium donné n'a ni cause suffisante, ni date prévisible. Il est régi par une loi ne permettant pas de prédire quoi que ce soit pour cet atome, mais seulement statistiquement pour une population d'atomes. Et l'état actuel d'un échantillon ^{238}U contenant du ^{234}Th ne permet pas de reconstituer en pensée la succession des décompositions (quel atome, à quelle date).



Décomposition radioactive de ^{238}U - © Microsoft Bing Creative Commons.
Dans le cercle de chaque isotope comme ^{238}U on trouve son numéro atomique (92) et sa demi-vie (4,5e9=4.5 .10^9 années). La flèche qui en part indique le type de décomposition (α, β^-).

2.1 Conclusions doctrinales

Rejet du Déterminisme philosophique

Au niveau des atomes de ^{238}U, la doctrine du Déterminisme philosophique ne tient pas ses promesses de prédiction des états futurs et de reconstitution en pensée de l'historique des états passés. Elle ne prévoit pas, non plus, l'absence de cause externe de ce phénomène de décomposition.

Cet unique contre-exemple suffit pour qu'on rejette ce déterminisme en tant que principe, car un principe doit être vérifié dans tous les cas. En outre, la physique connaît aujourd'hui de nombreux exemples de viols de ce « principe ».

Construction d'une meilleure définition de l'adjectif « déterministe »

Puisque le Déterminisme philosophique, tel que Laplace le définit, ne peut ni toujours prédire les états futurs ni toujours reconstituer les états passés, voyons les conditions que doit vérifier un déterminisme de loi d'évolution :

- Il doit affirmer la causalité, externe ou interne : une cause suffisante *C* (un état de système ou des circonstances) produit une évolution *E* : $C \Rightarrow E$;
- Il doit postuler l'existence d'une loi *L* qui régit cette évolution, c'est-à-dire que les mêmes causes produisent toujours les mêmes conséquences : $C \overset{L}{\Rightarrow} E$;
- Il doit postuler que cette loi est une condition nécessaire et suffisante de l'évolution (nécessaire pour éliminer le hasard ou les interventions transcendantes, suffisante pour déclencher certainement l'évolution dès que l'état du système existe) : $E \Leftrightarrow (C \overset{L}{\Rightarrow} E)$

Ces conditions permettent de préciser la définition de l'adjectif *déterministe* :

> **« L'adjectif déterministe qualifie une opération, une évolution ou une règle dont le résultat ne dépend que des données ou circonstances initiales, et qui est soumise à une loi. »**

Cette définition réserve le qualificatif *déterministe* à un changement, et remplace la prédiction d'un état final du Déterminisme philosophique traditionnel par la simple promesse d'un changement conforme aux conditions initiales et à la loi.

Remarque sur les résultats d'évolution du Déterminisme philosophique

Le Déterminisme philosophique définit aussi à tort un *résultat d'évolution*, sans préciser si c'est à un instant donné ou après la fin de l'évolution. Ce résultat est une *valeur de variable* ou *l'état du système* qui a évolué. Cette définition est malheureuse, car nous verrons que *le déterminisme n'entraîne pas toujours la prédictibilité d'un résultat*.

Les causes déterministes produisent une évolution, pas nécessairement un résultat unique :

> **« Le résultat déterministe d'une cause (situation initiale) est nécessairement une évolution selon une loi. »**
> (Non un état résultant unique)

Sont déterministes, par exemple : un programme d'ordinateur ; la loi physique de la chute des corps ; la loi d'Ohm décrivant la différence de potentiel aux bornes d'une résistance parcourue par un courant électrique.

Les évolutions de la nature sont régies par des lois
Qualifier une évolution de système de déterministe c'est nécessairement affirmer qu'elle est régie par des lois, sans effet du hasard ou d'une transcendance. Comme Laplace, nous postulerons que *toutes* les évolutions naturelles sont déterministes, et nous justifierons cette doctrine dans ce texte.

Nécessité d'un Déterminisme statistique
Le phénomène naturel de décomposition radioactive fait apparaître le besoin d'un type particulier de déterminisme, que nous qualifierons de *statistique*. La désintégration radioactive est bien une évolution déterministe : la vitesse de désintégration d'un échantillon ne dépend que de son état initial, et son taux instantané de désintégration est régi par *la loi de la demi-vie*, qui produit une probabilité statistique du pourcentage de matière désintégrée en fonction du temps.

Cette loi de décroissance relève bien du déterminisme, et non du hasard. Même si aucune date ne peut être prédite pour la désintégration d'un atome d'uranium donné d'un échantillon, cette désintégration n'est pas imprévisible, elle est régie par une loi au niveau de sa proportion globale. Selon cette loi, la nature remplace le niveau de précision atome-par-atome (auquel nous nous attendrions) par le niveau plus global de l'échantillon lui-même. La période de demi-vie de l'élément ^{238}U résulte d'une loi d'évolution physique déterministe décrite par un outil mathématique appelé *Mécanique quantique*, dont les prédictions ont une interprétation statistique bien que son équation d'évolution soit déterministe au sens traditionnel ; nous en reparlerons.

On connaît aujourd'hui beaucoup d'évolutions dont les lois de prédiction sont statistiques. Celles-ci décrivent des états résultants d'un système dont certaines variables sont de type stochastique : leurs valeurs sont distribuées selon une loi statistique précise, elles ne sont pas au hasard.

Exemple : Les calculs de Mécanique quantique montrent qu'une molécule d'ammoniac (NH3) peut se former dans l'un de deux états, avec l'atome d'azote situé au-dessus ou au-dessous du plan des trois atomes d'hydrogène. Une molécule d'ammoniac donnée peut ainsi avoir 50 % de chance d'être au-dessus du plan des atomes d'hydrogène, et 50 % de chance d'être en dessous (voir sa structure) : le résultat de l'équation de formation "hauteur au-dessus du plan" a deux valeurs, chacune avec une probabilité d'occurrence de 50% si une molécule est sélectionnée par un procédé aléatoire d'extraction.

Avant une telle extraction, nous verrons ci-dessous qu'une molécule nouvellement formée est *composée des deux états à la fois*, existant ensemble, formant un état combiné appelé *superposition quantique d'états*, avec une masse moléculaire combinée exactement égale à celle d'une molécule extraite.

Nous verrons plus loin que le Déterminisme statistique est un cas particulier du type le plus général de déterminisme, le Déterminisme général, qui régit toutes les lois d'évolution de la physique.

Nécessité d'un Déterminisme restreint, à résultat d'évolution unique
Ce n'est pas parce que la décomposition radioactive se produit sans cause externe ni résultat d'évolution unique, qu'il n'existe pas d'évolution nécessitant une cause externe et produisant un résultat unique.

Exemple : la 2ème loi de Newton associe une cause externe (la force) à un résultat unique : l'accélération qu'elle communique à une masse.

Comme cette caractéristique de "résultat unique" existe pour toutes les lois physiques issues des lois de Newton, des équations de Maxwell ou des lois de la Relativité d'Einstein, nous appellerons le type de déterminisme dont elle dépend *Déterminisme restreint*, un sous-ensemble du Déterminisme statistique, lui-même un cas particulier du Déterminisme général.

La relation que nous avons ici entre le Déterminisme restreint et le Déterminisme général est comparable à la relation entre la Relativité restreinte et la Relativité générale ; c'est voulu.

2.2 Evolution dans le temps d'une décomposition radioactive

La lecture de ce paragraphe technique n'est pas indispensable à la compréhension du reste de l'ouvrage, dont l'objectif est seulement la philosophie du déterminisme.

Dans le cas de la décomposition radioactive de l'uranium, la loi d'évolution s'applique, à chaque instant *t*, à la population de *N(t)* atomes ^{238}U non encore décomposés : le nombre de décompositions par unité de temps est proportionnel à *N(t)*, voir loi ci-dessous.

Loi d'évolution d'une décomposition radioactive : loi de la demi-vie

> **« Dans une population d'atomes donnée d'un élément radioactif, 50% se décomposent au bout d'un temps fixe τ appelé *demi-vie* de cet élément. »**

Le nombre *N(t)* d'atomes non décomposés d'un échantillon qui en comptait N_0 à l'instant *t=0* décroît selon la loi exponentielle :

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t},\ \text{où :}$$

- λ est une durée appelée *constante de décomposition* ;
- la date-heure à laquelle le nombre d'atomes non encore décomposés est 50% de N_0 est $\tau = \frac{ln2}{\lambda}$ où *ln2* est le logarithme népérien de 2 : 0.692.

Cette loi est *statistique* : la proportion « 50% en τ secondes » est la limite de la moyenne des proportions observées lorsqu'un nombre d'échantillons tend vers l'infini.

L'isotope ^{238}U n'est pas le seul à se décomposer spontanément. En voici quelques autres, avec les demi-vies correspondantes :

Isotope	Elément	Demi-vie (années)
^{3}H	Tritium	12.3
^{90}Sr	Strontium	28.9
^{232}U	Uranium	68.9
^{14}C	Carbone	5730
^{239}Pu	Plutonium	24110
^{230}Th	Thorium	75400
^{244}Pu	Plutonium	$80 . 10^{6}$
^{238}U	Uranium	$4.47 . 10^{9}$
^{50}V	Vanadium	$1.4 . 10^{17}$

Demi-vies de divers isotopes
En comparaison : l'âge de l'Univers est $4.6 . 10^{9}$ années

Enfin, quelques isotopes se décomposent vite : l'einsteinium ^{253}Es en 20.5 jours, le mendelévium ^{256}Md en 78 minutes et l'ununhexium ^{293}Uuh en 6 millisecondes.

Redéfinissons à présent le déterminisme conformément aux conditions précédentes.

3 Postulats du déterminisme

Nous allons définir le déterminisme progressivement, en accroissant son domaine d'application par étapes. Nous commencerons par un déterminisme proche du Déterminisme philosophique de Laplace, mais qui ne promet pas le résultat d'évolution unique critiqué dans le cas de la radioactivité : le *Déterminisme restreint*.

Déterminisme restreint

Le Déterminisme restreint est une doctrine basée sur le postulat suivant :

> **« L'évolution dans le temps de tout système physique est régie par deux postulats : le *Postulat de causalité* et la *Règle de stabilité* ».**

Toute évolution qui satisfait ces deux postulats est qualifiée de *déterministe* ; réciproquement, toute évolution déterministe satisfait ces deux postulats.

3.1 Postulat de causalité - Principe de raison

Loi de la causalité

L'enchaînement naturel des causes et des effets est régi par le postulat de causalité.

Définition du postulat de causalité

Le postulat de causalité est une condition nécessaire et suffisante.

Condition nécessaire : le Principe de raison

> **« Tout phénomène constaté (situation ou évolution) a nécessairement une raison, cause efficace dans l'Univers qui l'a créé ou déclenché. Cette cause l'a précédé, il résulte d'elle et seulement d'elle. »**

Conséquences

- Tout ce qui existe, a existé ou existera dans l'Univers a une *chaîne de causalité* remontant au Big Bang, commencement de l'Univers.

  Chaîne de causalité
  Cette notion, aujourd'hui obsolète, a été abondamment utilisée dans les raisonnements des philosophes comme Kant. La voici.

  Toute raison suffisante est basée sur une cause définie à un instant t_1, elle-même basée sur une autre cause définie à un instant t_2 précédant t_1, etc. La suite de ces causes définit une *chaîne de causalité* qui remonte le temps jusqu'à une *cause première*, postulée faute d'en connaître la cause ou pour que la chaîne reste finie (ce qui constitue une exception à la causalité, en inventant une cause sans cause comme Dieu Créateur, logiquement absurde mais nécessaire parce qu'on ne savait pas définir une cause à l'infini).

  Dans notre Univers, toutes les causes physiques remontent dans le temps jusqu'à l'ère de Grande unification qui a suivi le Big Bang, parce que nos connaissances physiques ne nous permettent pas de penser ce qui précéderait l'ère d'Inflation autrement que de manière spéculative .

- Nous savons aujourd'hui qu'aucune intervention transcendante (de l'extérieur de l'Univers ou précédant son existence) n'est possible : aucune n'a créé, ne créera ou ne modifiera quelque chose dans l'Univers, parce que l'Univers étant en

expansion plus rapide que la vitesse de la lumière, cette intervention se propagerait plus vite qu'elle, ce que la Relativité interdit.

Remarque : si on admet la théorie du Big Bang, on ne peut admettre l'existence d'un Dieu créateur capable d'agir physiquement aujourd'hui dans l'Univers tout en restant cohérent.

- Aucune cause de l'Univers ne peut agir à l'extérieur – si cet extérieur existe (même raison : la Relativité).

Condition suffisante

« Il suffit que la cause efficace (situation) existe dans l'Univers pour que la conséquence (une évolution régie par une loi) y ait lieu immédiatement. » (C'est une certitude.)

Exemple - Je tiens une pierre dans ma main :

- Si elle tombe, c'est que je l'ai lâchée : condition nécessaire ;
- Si je la lâche elle tombe, condition suffisante :
  la cause (lâcher la pierre) est alors aussi appelée *cause efficace*.

La condition suffisante d'évolution ne suffit pas pour que celle-ci ait un caractère déterministe : il faut en plus qu'elle soit régie par une loi de la nature, c'est-à-dire qu'elle respecte la *Règle de stabilité*, qui s'énonce :

« La même cause produira le même effet, partout et toujours. »

Nous reviendrons sur cette règle plus loin.

Remarque importante : la définition du postulat de causalité ne promet qu'une évolution conforme à une loi stable ; elle ne promet aucune prédictibilité de résultat.

Opposition entre déterminisme et hasard
Cette définition fait du déterminisme l'opposé du hasard, défini comme :

« Est au hasard une situation ou une évolution qui n'a ni cause ni loi. »

3.2 Comprendre et prévoir

En général, le postulat de causalité répond aux besoins de la pensée rationnelle d'expliquer une situation et de prévoir le résultat d'une évolution :

- La condition nécessaire permet théoriquement d'expliquer au moins en partie une constatation (évolution ou situation), en remontant le temps jusqu'à sa cause : « si la pierre tombe, c'est que je l'ai lâchée » ;
- La condition suffisante permet de prévoir une conséquence, en suivant le temps vers l'avenir depuis sa cause : l'évolution immédiate est déclenchée à coup sûr : « si je lâche la pierre, elle tombe (c'est certain) selon la loi de gravitation de Newton ».

La causalité fait partie des principes de l'entendement, pas de ceux de la logique

Kant écrit, page 647 de la *Critique de la raison pure* [20] :
"Si ce sont des principes de l'entendement (par exemple, celui de la causalité)…"

Ce postulat est utilisé si spontanément qu'on fait parfois l'erreur de considérer la causalité comme un principe de Logique. Or il n'y a de causalité que pour les

phénomènes physiques comprenant un échange d'énergie (on parle aussi de cause efficace, ou efficiente ou suffisante) ; les causes matérielle, finale et formelle d'Aristote ne sont pas soumises à une loi naturelle de causalité.

3.3 Les deux sortes de déductions causales

Il y a deux sortes de déduction causale :

- La causalité *logique*, applicable à toutes les déductions de propositions logiques comme :
  - ($a<b$ ET $b<c$) $\Rightarrow$ ($a<c$), où "$\Rightarrow$" se lit "ENTRAINE" et le point "**.**" se lit "ET",
  - ou le syllogisme $(a \Rightarrow b \,.\, c \Rightarrow a) \Rightarrow (c \Rightarrow b)$.
- La causalité *naturelle*, applicable à toute évolution physique comme la 2ème loi de Newton. Cette causalité existe à deux niveaux :
  - Le niveau des lois de la nature, régissant toutes les évolutions. Exemple : la conservation de la charge électrique d'un système isolé.
  - Le niveau de la valeur d'une variable particulière, soumise à une certaine loi. Exemple : valeur de la tension V aux bornes d'une résistance R parcourue par un courant I : $V = RI$ (loi d'Ohm).

Séparation des deux types de causalité

Les déductions par causalité logique ne s'appliquent pas aux phénomènes naturels et les déductions par causalité naturelle ne s'appliquent pas aux propositions logiques. On ne peut donc pas, par exemple, déduire par raisonnement logique une réalité physique : il ne peut pas exister de preuve logique de l'existence d'un Dieu capable de créer l'Univers physique ou d'y agir.

- D'une description d'un Dieu créateur, quelle qu'elle soit, on ne peut déduire logiquement son existence physique, Kant l'a démontré dans la Critique.

  Et la logique pure ne peut pas, non plus, démontrer un effet causal physique : la logique et la physique sont deux domaines de connaissance tels qu'aucune déduction n'est possible de l'un à l'autre. La logique impose seulement à la physique la non-contradiction de deux affirmations sur un même sujet.
- Un Dieu purement abstrait (l'Idée de Dieu) ne peut être cause efficace de l'Univers, malgré la doctrine idéaliste de Platon qui voudrait que toute réalité soit copie d'une Idée (l'Idée étant la seule réalité éternelle). La raison en est l'absence de preuve : aucune représentation de phénomène, aucune existence d'objet en tant que concept n'est la cause d'existence d'un objet réel. Du temps de Platon et jusqu'au siècle des Lumières on admettait la copie idéaliste sans preuve, depuis on exige des preuves.
- On peut concevoir un Dieu physique existant avant l'Univers qu'il aurait créé, mais on ne peut prouver factuellement ni l'existence ni la non-existence de ce Dieu, ni la possibilité ni l'impossibilité d'un tel acte de création : Kant l'a aussi démontré dans la Critique.

Pendant des siècles, dans les raisonnements sur les phénomènes naturels, les philosophes comme Descartes ont utilisé une *causalité divine ;* de leur côté*,* les philosophes de l'antiquité ont utilisé une causalité *morale* (Bien/Mal) ; enfin, les Grecs ont utilisé une causalité *esthétique,* comme l'harmonie de la nature, qui imposait aux

astres de la « sphère supérieure » d'avoir des mouvements parfaits, donc circulaires et uniformes.

Aujourd'hui nous admettons la causalité *psychologique* dans les rapports humains… Nous sommes enfin revenus à la causalité du matérialiste Démocrite, pour qui un phénomène matériel ne peut avoir qu'une explication matérielle.

3.4 Précisions sur la notion d'évolution utilisée dans ce texte

Une évolution concerne un système qui change sous l'effet d'une cause efficace.
Quand je dis : « Une pierre lâchée tombe » :

- Le système qui évolue est la pierre ;
- L'évolution est la chute. Elle est régie par deux lois :
  - La loi de gravitation universelle, qui exerce une force attractive ;
  - La deuxième loi de Newton, d'où on peut déduire l'évolution de la hauteur de la pierre en fonction du temps.
- La cause efficace est la force du champ de gravitation, la pesanteur.

L'échange d'énergie

Une cause efficace d'évolution met en œuvre une énergie. Toute évolution suppose donc un échange d'énergie ; en tombant, la pierre perd de l'énergie potentielle de gravitation et gagne de l'énergie cinétique en prenant de la vitesse.

- Bien que déterministe, la trajectoire d'un rayon lumineux réfléchie par un miroir n'est pas une évolution : il n'y a pas d'échange d'énergie.
- Dans une tige métallique isolée, plus chaude à une extrémité qu'à l'autre, la chaleur se propage de la première à la seconde. L'énergie du système étant constante, cette propagation déterministe de la chaleur, soumise à la loi de diffusion thermique de Fourier, n'est pas non plus une évolution.
- Une planète décrivant sa trajectoire elliptique dans l'espace vide autour du Soleil n'échange aucune énergie, en l'absence d'influence gravitationnelle d'autres corps célestes : son mouvement déterministe et perpétuel n'est pas non plus une évolution.
- Dans une casserole d'eau au-dessus d'un brûleur l'eau qui bout subit une transformation : son changement déterministe de phase (passage de l'état liquide à l'état gazeux dû à l'apport de chaleur) est une évolution.

3.5 Lois d'évolution et lois descriptives

Il y a des lois physiques purement descriptives. Exemple : deux des lois de Newton (la loi d'inertie et la loi d'action et de réaction), qui n'impliquent pas d'échange d'énergie, sont des *lois descriptives* n'impliquant pas d'évolution. Une telle loi déterministe permet des calculs dont le résultat est conséquence immédiate de la formule associée à la loi, alors qu'une loi d'évolution exige du temps et de l'énergie.

Il y a donc deux types de lois physiques de la nature : les lois d'évolution et les lois descriptives. Les lois d'évolution du déterminisme tirent les conséquences d'un échange d'énergie. Elles décrivent des variations de variables en fonction des valeurs des mêmes variables ou d'autres ; leur expression mathématique utilise des *équations différentielles*.

Conformément à la définition de l'adjectif *déterministe*, nous inclurons dans l'ensemble des lois physiques déterministes les lois descriptives comme celles de l'optique géométrique. Ces dernières ne régissent pas une évolution, mais un trajet de rayons lumineux ; elles peuvent être qualifiées de déterministes car tout trajet est fonction des conditions initiales (le système optique) et respecte des lois. Une loi descriptive s'applique à un phénomène qui ne change pas, ou qui n'échange pas d'énergie au sens thermodynamique.

Autres exemples de lois descriptives : deux des trois lois de Newton (la loi d'inertie et la loi d'action et de réaction), qui n'impliquent ni échange d'énergie, ni évolution.

Une loi descriptive permet des calculs dont le résultat est conséquence *immédiate* de la formule associée à la loi, avec ses données. Une telle loi n'est pas, à proprement parler, une loi de causalité : il n'y a pas de cause précédant un effet, ce n'est qu'une déduction logique.

3.6 Une évolution est soit conservative, soit dissipative

Au point de vue échange d'énergie une évolution est conservative ou dissipative.
Voici deux définitions concernant la Mécanique en tant que science.

- La *Mécanique classique* est la branche de la physique de Newton qui étudie mathématiquement les mouvements de corps solides.
- La *Mécanique analytique* est une branche de la Mécanique classique très générale et abstraite, utile en physique théorique et en Mécanique quantique.

Définition d'un système conservatif

En Mécanique analytique, on appelle système *conservatif* un système matériel qui a une énergie constante car sans échange avec l'extérieur ; c'est le cas notamment des systèmes sans frottement (en pratique ceux où les frottements ne perturbent l'évolution que de manière négligeable) ; exemple : une planète qui tourne autour du Soleil.

Le modèle mathématique d'évolution d'un système conservatif a une symétrie temporelle : c'est un système d'équations différentielles invariable par changement de la variable de temps *t* en *-t* ; l'évolution vers l'avenir est alors remplacée par une évolution vers le passé décrite par les mêmes équations, c'est un retour des conséquences aux causes.

Définition d'un système dissipatif

Un système qui n'est pas conservatif (qui échange de l'énergie avec l'extérieur) est dit *dissipatif*. Les équations différentielles qui en décrivent l'évolution changent lorsqu'on remplace t par -t. C'est le cas de toutes les évolutions où il y a un frottement, ou (en astronomie planétaire) des marées gravitationnelles.

Marées gravitationnelles

Ensemble, la grosse planète Jupiter et son satellite Europe exercent sur le petit satellite Io une attraction variable, tantôt plus forte quand Io se rapproche de leur centre de gravité, tantôt plus faible quand il s'en éloigne. Il en résulte des forces qui alternativement compriment ou tendent la matière de Io, ce qui génère une chaleur telle que Io a des volcans qui crachent de la matière en permanence. L'énergie ainsi

dispersée par Io provient d'une perte de son énergie potentielle dans le champ gravitationnel du couple Jupiter-Europe.

3.7 Le déterminisme promet l'évolution, pas la prédiction

En réponse à une cause efficace, la définition de Daniel Martin du postulat de causalité ne promet qu'une *évolution conforme à une loi* ; elle ne promet aucune *prédictibilité de résultat*, parce qu'une telle prédictibilité est possible à l'échelle macroscopique mais pas à l'échelle atomique (voir *Radioactivité naturelle*) ou dans les phénomènes chaotiques (voir *Chaos* dans *Déterminisme des processus itératifs*).

Cette définition est très différente de la définition traditionnelle des philosophes depuis Aristote. Pour eux, la causalité fait passer d'un état initial à son état conséquence, ou remonte la chaîne de causalité par états-causes successifs ou par dates de survenance.

- Le modèle "suite d'instants" des philosophes est discontinu, alors qu'une évolution est nécessairement ininterrompue tant que sa cause perdure, et même continue au sens mathématique lorsque sa loi est décrite par une équation différentielle.
- Le déterminisme "traditionnel" des philosophes prévoit un unique état conséquence d'un état initial donné, ce qui a deux inconvénients.
  - Le choix de l'instant où on considère le résultat est arbitraire, alors que l'évolution continue jusqu'à ce que la cause initiale change. Une même cause peut alors produire des résultats différents selon un critère arbitraire.
  - La prédiction d'un résultat unique est incompatible avec la physique quantique et les phénomènes chaotiques, nous le verrons plus bas.

  Le déterminisme défini par Daniel Martin n'a pas ces inconvénients.

3.8 Règle de stabilité (universalité, reproductibilité, invariance)

> **« La même cause produira le même effet, partout et toujours. »**
> (Postulat : toute évolution conservative est soumise à une loi de la nature.)

Cette règle postule que pour toute situation identique à une situation donnée S_0, qui entraîne une évolution ayant pour conséquence une situation S :

- La même loi d'évolution L de la nature s'appliquera et produira une situation identique à S au bout du même intervalle de temps ;
- Cette loi étant unique, une cause donnée entraînera toujours la même évolution ;
- Cette loi L ne change pas, le même énoncé s'appliquant :
  - Dans tout l'espace, lorsqu'on y considère des points d'application successifs distincts,
  - Dans le présent, le passé et l'avenir.

Conséquence : si deux systèmes fermés sont identiques, ils le resteront en subissant la même évolution, quel que soit leur éloignement dans l'espace ou le temps.

Stabilité plutôt qu'universalité – Postulats fondamentaux de la physique

Dans la définition du Déterminisme restreint, le nom *Règle d'universalité* serait vague, car il ne correspond pas à des critères physiques précis. Le nom *Règle de stabilité* lui

a été préféré parce qu'il correspond aux postulats physiques fondamentaux qui régissent les changements des systèmes conservatifs fermés :

- *L'homogénéité du temps*, d'où résulte la loi de conservation de l'énergie ;
- *L'homogénéité de l'espace*, d'où résulte la loi de conservation du moment (vecteur produit d'une masse par un vecteur vitesse) ;
- *L'isotropie de l'espace*, d'où résulte la loi de conservation du moment cinétique (vecteur produit vectoriel du vecteur distance à l'origine par un vecteur moment) ;
- *La symétrie gauche-droite de l'espace*, d'où résulte la loi d'invariance du produit *CP* des symétries *C* (charge électrique) et *P* (position par rapport à un plan) ;
- *La symétrie par rapport à la direction d'écoulement du temps* (changement de *t* en -*t*), d'où résulte la loi *T* de conservation des lois d'évolution lors d'un tel changement ;
- *Le théorème de Noether* sur la correspondance entre des symétries (invariances) fondamentales et des lois de conservation.

Domaine de connaissances de la physique

La métaphysique doit aussi délimiter le domaine d'application de la physique.

- A quel domaine de réalité s'applique la physique, et quel est son objectif précis ? S'applique-t-elle au seul champ de l'expérience accessible à l'homme, ou peut-on/doit-on y inclure, par exemple, des considérations théologiques sur Dieu créateur du monde, sur Sa finalité lors de cette création, sur Son intervention possible dans le monde actuel et sur l'harmonie de la nature ? Nous avons déjà vu que la notion de Dieu ne peut intervenir dans aucun discours scientifique.
- Comment définit-on la vérité d'une affirmation concernant la réalité physique, et comment la déduit-on de l'expérience ou de la logique pure ?
- Comment établit-on la cause qui explique un phénomène ? Et la cause de cette cause ? Une chaîne de causalité est-elle infinie vers le passé, ou comment s'arrête-t-elle ?

Les réponses à ces questions de conditions d'application sont dans ce texte.

3.9 Utilité du déterminisme : comprendre, prévoir, prédire

Avant d'agir et par curiosité, l'homme a besoin de *comprendre* une situation, de *prévoir* son évolution et d'en *prédire les conséquences* exactes.

Faute de comprendre une situation ou de prévoir son évolution, l'homme est inquiet : pour lui, instinctivement, ce qui est incompris ou imprévisible est peut-être menaçant ou empêche de profiter d'une opportunité.

Compréhension et prévision de l'évolution naturelle d'un système sont régies par un principe philosophique : le déterminisme ; croire qu'il en est ainsi, c'est adopter la doctrine du déterminisme.

Comprendre la situation d'un système, c'est décrire :

- son état actuel dans son environnement ;

- son évolution passée, prélude à une compréhension causale du phénomène et une réponse à la question : était-elle inévitable ?

Prévoir l'évolution d'un système, c'est :

Décrire qualitativement cette évolution :

- déroulement, variables et domaine de définition ;
- est-elle bornée ou diverge-t-elle (va-t-elle à l'infini) ;
- diagramme des bifurcations ;
- a-t-elle un résultat unique ou a-t-elle un ensemble de résultats (et si oui, quelle est la structure de cet ensemble - par exemple une distribution statistique de valeurs) ?
- a-t-elle des symétries, une auto-similitude, des propriétés statistiques ?
- a-t-elle des solutions sensibles aux conditions initiales ?
- si elle est bornée, va-t-elle vers une forme limite, par exemple asymptotique à une courbe, ou oscille-t-elle indéfiniment ? ;
- répond-elle aux conditions d'universalité ? ;
- si elle ne va pas vers une forme limite, est-elle au moins stable ou est-elle chaotique ?

Décrire quantitativement cette évolution par une loi physique, qu'il faut donc connaître ou proposer :

- décrire les états futurs du système, avec la précision attendue des valeurs de leurs paramètres. Si cette précision n'est valable qu'à un horizon limité – comme c'est le cas pour le déplacement d'une particule atomique dont le paquet d'ondes s'étale progressivement, ou pour un système dynamique chaotique – chiffrer cet horizon ;
- évaluer les interactions de ce système avec son environnement.

Différence entre prévoir et prédire

Dans ce texte, lorsqu'il s'agit de la loi d'évolution de l'état d'un système :

- *Prévoir* une évolution de situation, c'est conjecturer qu'elle se produira par application de la loi *connue* d'évolution de la situation ; l'évolution est supposée possible, mais non certaine : elle peut n'être qu'une conjecture en fonction des conditions initiales.

  Exemple : je tiens une pierre à la main ; si (et seulement si) je la lâche, je prévois qu'elle tombera d'un mouvement uniformément accéléré.

  Prévoir c'est aussi décrire qualitativement l'évolution (comme ci-dessus).

- *Prédire* une situation, c'est annoncer le résultat numérique de l'évolution prévue, et en décrire les détails.

  Exemple : je prédis que la pierre arrivera à la hauteur précise h (à Δh près) à l'instant t (à Δt près).

- En physique macroscopique la prédiction porte sur un ensemble unique de valeurs précises ;
- En physique atomique (et en utilisant la Mécanique quantique, son outil de calcul), la prédiction pour chaque variable porte sur un ensemble de valeurs, chacune associée à une probabilité ou une densité de probabilité :

  La Mécanique quantique substitue une probabilité statistique à la certitude du Déterminisme restreint, et un ensemble de résultats d'évolution *possibles* à un résultat unique *certain*.

Conséquences déterministes

« Le déterminisme entraîne la prévisibilité, mais pas toujours la prédictibilité d'un résultat unique. »
(L'imprédictibilité affecte la physique quantique et les phénomènes chaotiques.)

- Le comportement évolutif d'un système déterministe est prévisible par définition, mais il peut :
  - ne pas être prédictible, par exemple s'il est chaotique : nous verrons cela à propos des systèmes dynamiques ;
  - n'être prédictible qu'en tant qu'élément indéterminé d'un ensemble prédictible, s'il est à l'échelle atomique où l'interprétation des lois d'évolution est celle (statistique) de la Mécanique quantique.
- La loi d'évolution d'une situation donnée ne dépend pas du système d'axes de référence (le référentiel).

  On peut *prévoir* la même évolution selon cette loi dans tout référentiel. Mais *prédire* les résultats numériques de cette loi dépend de la position et du mouvement relatif de l'observateur-prédicteur par rapport au référentiel où l'évolution a lieu. Ce sujet est abordé dans [0] à propos de la Relativité restreinte.

3.10 Le caractère déterministe ne doit pas être jugé d'après des situations

Une loi de la physique n'a pas d'exception

Le postulat du déterminisme a vocation à régir toutes les lois de la nature. Les philosophes ont souvent l'habitude de juger le caractère déterministe d'une telle loi d'après le résultat (supposé unique) de son application, par exemple en vérifiant qu'elle produit des résultats expérimentaux conformes aux prédictions.

Or un résultat est une notion humaine définie par des conditions arbitraires : « à tel instant », « à la fin de », « à tel endroit », etc. En jugeant le caractère déterministe d'une évolution naturelle d'après quelques résultats on applique des critères humains, à validité limitée aux conditions arbitraires définissant ces résultats : instants, lieux, valeurs de variables, etc. Mais pour valider une loi, le résultat d'une évolution ne doit pas dépendre de critères arbitraires. C'est pourquoi dans le critère « …est déterministe parce que tels résultats sont conformes aux prédictions » le mot « résultats » doit être remplacé par « évolution » : la conformité des résultats aux prédictions doit être vérifiée pendant toute l'évolution, pas seulement dans des circonstances arbitraires.

Une loi physique s'applique tant (et seulement tant) que sa cause existe

Le caractère ininterrompu de la cause d'une évolution doit se traduire par le caractère ininterruptible de l'application de sa loi. On ne doit pas étudier et juger cette application à un ensemble d'instants distincts, et la loi doit s'appliquer sans discontinuer tant que les hypothèses initiales restent vraies.

Critique des raisonnements par chaînes de causalité

Le modèle d'évolution causale de philosophes comme Kant, qui ne raisonnent qu'avec des chaînes de causalité faites de situations successives distinctes dans le temps, est critiquable. Leurs raisonnements souffrent alors de problèmes de commencement et de fin du temps (à une certaine date ?, à l'infini ?). Ils souffrent aussi de problèmes de causalité, dus à l'incompatibilité formelle entre la continuité intrinsèque de l'évolution et la discontinuité des instants de jugement. Avec une chaîne causale de situations distinctes, une situation infiniment lointaine dans le passé ou l'avenir n'existe pas (de même que l'infini n'est pas un nombre), et aucun critère mathématique de limite ou de convergence ne s'applique.

Des questions comme « le monde a-t-il un commencement, une fin ? » et « y a-t-il une cause première, une fin ultime ? » doivent donc s'étudier comme une fonction continue du temps lorsque celui-ci tend vers l'infini du passé ou du futur, en prenant en compte les possibilités de convergence et de divergence de la loi d'évolution à distance finie ou à l'infini. Les études de phénomènes continus par raisonnement philosophique à étapes purement logiques butent sur des paradoxes comme le *Paradoxe d'Achille et de la tortue*.

3.11 Les deux types de base d'objets de la physique

Les objets physiques n'ont que deux composants de base, la masse-énergie et la charge électrique. Il n'y a donc que deux groupes fondamentaux de lois d'évolution : le groupe des lois de Newton (pour la masse-énergie) et celui des équations de Maxwell (pour la charge électrique) ; toutes les autres lois de la physique macroscopique régies par le Déterminisme restreint s'en déduisent ; les lois de la thermodynamique relèvent aussi du Déterminisme restreint. Et compte tenu du *Principe de correspondance*, les lois de la physique quantique s'en déduisent également.

> **« Les évolutions macroscopiques n'ont pour lois fondamentales que celles de Newton et Maxwell. »**
> (Mais il y a une différence entre ces évolutions et les changements d'état.)

Conséquence : les propriétés déterministes des lois d'évolution de la physique seront celles de ces lois et équations fondamentales de la masse-énergie et des charges.

3.12 Lois d'évolution régies par le Déterminisme restreint

Le Déterminisme restreint régit donc toutes les lois d'évolution macroscopiques conservatives appartenant à l'un au moins des deux types de base précédents. Il régit aussi les lois de la thermodynamique, simples statistiques sur des considérations macroscopiques d'énergie et d'information. Il régit, enfin, les lois de la Relativité restreinte et de la Relativité générale, qui sont basées sur les lois de Newton et les équations de Maxwell.

3.13 Portée du déterminisme : locale ou globale

Le déterminisme *local* régit l'évolution à partir d'une situation de départ sous l'effet d'une loi d'évolution locale, qui s'applique à la situation de départ indépendamment des situations qui l'ont précédée. Son application est continue au sens mathématique, de proche en proche, et ininterruptible tant que sa cause elle-même n'est pas interrompue.

Mais la forme locale n'est pas la seule que le déterminisme peut prendre. Il peut aussi, en agissant de manière plus *globale* :

- Choisir une loi d'évolution parmi plusieurs possibles, comme dans le cas des bifurcations et dans le *Principe de moindre action de Maupertuis*, le *Principe de Fermat* et les *Quasi-cristaux* décrits en détail dans [0].

  Mais le *Principe de correspondance* (décrit dans [0]) fait qu'aucune loi de portée donnée ne peut faire évoluer une même situation de manière différente de celle d'une loi d'une autre portée : la nature est cohérente et l'homme postule des lois cohérentes.

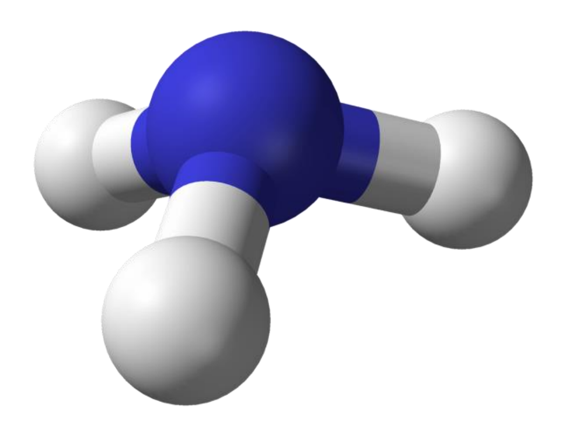
- Grouper un certain nombre de variables, en précisant une loi d'évolution globale qui interdit de connaître l'évolution d'une des variables prise isolément ; c'est le cas avec le Déterminisme statistique, les observables complémentaires de la Mécanique quantique et ses particules corrélées (intriquées).

4 Déterminisme statistique

Nous avons vu que la décomposition radioactive naturelle nécessite un déterminisme autre que le Déterminisme philosophique. Nous en verrons une définition précise plus bas. Mais voici un phénomène qui justifie son existence : la formation de la molécule d'ammoniac NH_3.

4.1 Formation de la molécule d'ammoniac en superposition d'états

Dans une molécule d'ammoniac NH_3 les 4 atomes sont reliés par des forces électriques, les liaisons chimiques ; celles-ci imposent une structure où l'atome d'azote N est à une certaine distance du plan des 3 atomes d'hydrogène H, et à égale distance de chacun. Les calculs de Mécanique quantique montrent que, lors de la synthèse de la molécule, il y a deux positions possibles de l'atome d'azote, de part et d'autre du plan des trois atomes d'hydrogène.



Molécule d'ammoniac NH_3 – Bleu : atome d'azote N – Gris : atomes d'hydrogène H
(un seul des deux états possibles est représenté : N au-dessus du plan des H)
Les liaisons chimiques entre l'azote et chaque hydrogène partagent un électron

Evolution vers un ensemble d'états superposés

Ces calculs de Mécanique quantique ont deux solutions, correspondant à une molécule *qui existe dans deux états possibles*. L'état de la molécule NH_3 à la fin de sa formation est un état particulier de la matière appelé *superposition quantique d'états*, ou plus simplement *superposition d'états* ; dans cet état, la molécule NH_3 *existe dans ses deux états à la fois*. Un tel état n'existe qu'au niveau atomique, et tant qu'il n'y a eu aucune interaction avec le niveau macroscopique ; sa durée d'existence est donc en principe très courte et on ne peut jamais le voir.

Le déterminisme doit donc prendre en compte ce phénomène de multiplicité d'états dû à une superposition pour régir aussi les lois de l'échelle atomique.

> **A l'échelle atomique les lois d'évolution peuvent avoir *un ensemble* de solutions simultanées, contrairement à l'échelle macroscopique.**
> (A l'échelle atomique, les évolutions d'un système dans l'espace et le temps sont décrites par l'équation de Schrödinger, qui est un des outils mathématiques de la Mécanique quantique.)

Le type particulier de déterminisme régissant les lois de l'échelle atomique sera appelé *Déterminisme statistique*, sous-ensemble du *Déterminisme général* abordé plus bas.

4.2 Une superposition d'états est un état particulier de la matière

Une superposition d'états d'une particule ou d'un système de particules est son état (comme les états solide, liquide, gaz et plasma) à la fin de l'évolution ou de la formation prévue par l'équation de Schrödinger de la Mécanique quantique. Les divers états quantiques simultanés issus de cette évolution partagent une même masse-énergie et quelques autres propriétés, la plupart existant aussi à l'échelle macroscopique. Du fait de ce partage de propriétés physiques et mathématiques, la superposition quantique d'états est dite *cohérente*. Mais nous allons voir que cet état de la matière n'est pas structuré.

Fragilité d'une superposition d'états - Décohérence

Cet état est très fragile parce qu'*il n'a aucune énergie de liaison*. Il n'a pas, comme dans une molécule d'oxygène O_2, une énergie potentielle négative liant les atomes d'oxygène, énergie qu'il faudrait fournir pour séparer la molécule en ses deux atomes.

Une telle énergie n'a pas été dégagée lors de la formation de la superposition, par exemple sous forme d'émission de photon : elle aurait fait partie de l'évolution terminée en superposition et nous n'en avons pas supposé ou constaté l'existence dans les évolutions à l'échelle atomique.

La superposition d'états existe donc à la fin de l'évolution d'une façon instable, et toute énergie macroscopique reçue de l’extérieur en séparera immédiatement les éléments, l’état unique ainsi choisi recevant toute cette énergie sous forme thermique. Le choix de cet état est imprévisible, car l’interaction n’est pas régie par la même loi que l'évolution à qui elle succède ; elle n’est régie par aucune loi à effet reproductible.

Exemple : une molécule d’ammoniac, formée en superposition d’états, se décomposera après un choc avec une autre molécule. La molécule résultant de la décomposition a 50% de chances d’avoir l’atome d’azote au-dessus du plan des hydrogènes et autant de chances de l’avoir au-dessous. Son énergie cinétique sous forme superposée changera lors du choc avec l’autre molécule, et se retrouvera dans un des états de la molécule ex-superposée.

Une superposition d'états a donc en général une courte durée de vie : une légère friction avec l'échelle macroscopique suffit pour la détruire, la réduisant à l'un de ses états constitutifs impossible à connaître d'avance ; il y a eu, alors, une *transition d'état* régie par une *loi d'interruption* (notion décrite plus bas). Cette transition est qualifiée de *décohérence*.

> **« La masse-énergie peut aussi exister en superposition d'états quantiques, état non structuré et fragile. »**
>
> **« Le résultat d'une évolution à l'échelle atomique peut être une superposition d'états quantiques partageant une masse-énergie, une charge électrique, etc. »**

Ce qu'on peut "voir" d'une superposition d'états

La superposition quantique d'états est mise en évidence dans certaines expériences de physique atomique en tant que résultat d'évolution [200], mais l'homme ne peut jamais en voir une physiquement, ses états sont virtuels. Toute tentative humaine de voir (à l'échelle macroscopique, par exemple lors d'une mesure) une superposition quantique d'états implique un échange d'énergie, qui perturbe suffisamment la

superposition pour la décomposer en ne retenant qu'un seul de ses états cohérents, état qui devient seul visible : il y a eu *décohérence*.

> **« La "durée de vie" d'une superposition d'états est d'autant plus courte que le système considéré interagit fortement (par exemple par chocs entre molécules) avec son environnement, la rendant ainsi instable. »**

Cette perturbation n'est pas décrite par la loi d'évolution qui a produit la superposition, puisqu'elle survient une fois l'évolution achevée. Son résultat ne peut donc pas être prédit par elle. Elle ne peut jamais être décrite quantitativement, car elle est due à une énergie macroscopique distincte de l'énergie d'évolution à l'échelle atomique. Le choix de l'état visible sélectionné parmi les états anciennement superposés n'est donc pas prédictible, car cette dernière perturbation ne peut être décrite précisément.

Une erreur fréquente

Cette imprédictibilité a été attribuée à tort par certains aux lois d'évolution des états quantiques, qu'ils ont qualifiées de non déterministes puisque certains peuvent produire de multiples évolutions et des résultats probabilistes. Cette opinion est erronée dans la théorie du déterminisme décrite dans ce texte, car être déterministe exige seulement qu'une évolution ne dépende que de son état initial et soit décrite fidèlement par une loi. Tel que défini dans ce texte, le Déterminisme statistique n'exclut pas les lois à résultats probabilistes multiples, il a été défini pour les régir.

Les résultats des lois d'évolution d'états quantiques sont des ensembles prédéterminés

La loi d'évolution qui s'applique à une situation donnée crée un ensemble résultant d'états superposés: on connaît parfaitement tous les éléments-états de cet ensemble dès la définition de l'évolution, et cet ensemble persistera pendant toute l'évolution ; ainsi une molécule NH_3 qui vient de se former est un ensemble d'états cohérents à 2 molécules-éléments : la molécule avec atome d'azote *au-dessus* du plan des hydrogènes et la molécule avec atome d'azote *au-dessous* du plan des hydrogènes. En fin de formation, une mesure ou une perturbation d'énergie choisira de manière imprévisible un des états superposés, celui qui sera visible et persistera à l'échelle macroscopique.

Des particules peuvent voyager en superposition d'états

Autre exemple naturel de superposition d'états : le neutrino. Citation de [318] :
« L'étude a montré que les particules peuvent être en état de superposition, sans entités individuelles, en parcourant des centaines de kilomètres... Elles peuvent osciller ou changer entre plusieurs "types" distincts, tout en voyageant dans l'espace à une vitesse proche de celle de la lumière... Les neutrinos partent de leur emplacement d'origine sous forme d'un certain du type, mais ils peuvent osciller pendant le voyage, atteignant leur destination sous forme d'un autre type.

''Ce qui est fascinant, c'est que beaucoup d'entre nous ont tendance à penser que la Mécanique quantique s'applique à petite échelle. Mais il s'avère que nous ne pouvons pas lui échapper, même lorsque nous décrivons des processus qui se produisent sur de grandes distances. Nous ne pouvons pas arrêter notre description de Mécanique quantique même lorsque ces choses quittent un état et entrent dans un autre, parcourant des centaines de kilomètres. Je pense que c'est à couper le souffle'', a

déclaré David Kaiser, professeur Germeshausen d'histoire des sciences et professeur de physique au MIT. »

En résumé :

> **« Des particules peuvent voyager en superposition d'états. »**
> (Ce qui prouve qu'une telle superposition peut durer un certain temps.)
>
> **« Des particules existant en plusieurs types susceptibles de coexister en superposition peuvent spontanément passer ou osciller d'un type à un autre. »**
> (Changement d'état ou oscillation se produisant ici sans échange d'énergie.)

4.3 Conclusions physiques - Pouvoir prévoir ne garantit pas de pouvoir prédire

On a démontré que la nature n'a pas, et ne peut avoir, de loi permettant de connaître le moment où *un* atome particulier se décomposera, ou de savoir *quel* est le premier atome d'un échantillon qui se décomposera : sa loi de décomposition ne s'applique – et ne peut s'appliquer - qu'à *une population* d'atomes.

Dans le cas de la décomposition radioactive on peut *prévoir* une évolution qualitativement (les éléments produits par cette décomposition), mais on ne peut pas *prédire* certains de ses résultats quantitatifs (comme l'heure où un atome particulier se décomposera ou l'heure de la première décomposition d'un atome). D'où l'importante conclusion métaphysique :

> **« Dans une évolution, pouvoir prévoir ne garantit pas de pouvoir prédire. »**

Il y a de nombreux phénomènes naturels dont l'évolution peut ainsi être prévue, mais pas prédite. Comme les exemples que l'on peut citer sont à l'échelle atomique, il faut citer l'outil mathématique des lois de physique atomique, la *Mécanique quantique*, qui explique notamment la décomposition radioactive.

4.4 Conclusions philosophiques – Instabilité

Le déterminisme naturel peut donc produire de *l'instabilité*, où l'état présent du système évoluera *sans cause externe* vers un état plus stable au bout d'un temps distribué statistiquement, un phénomène expliqué et chiffré en Mécanique quantique par le *Principe d'incertitude de Heisenberg*.

> **« L'instabilité de certains atomes ou molécules produit des changements d'état irréversibles relevant du Déterminisme statistique. »**

Autres caractéristiques du déterminisme

Le déterminisme est :

- *Continu* (ininterrompu) : tant qu'une cause existe, sa loi d'évolution s'applique.

  « Tout système naturel évolue sans cesse, et évoluera jusqu'à la fin des temps, l'équilibre thermodynamique n'étant jamais complètement stable. »
  (Tout endroit "vide" de l'Univers reçoit des rayonnements, donc de l'énergie, et subit des fluctuations quantiques**.)**

  « Tout corps rayonne, absorbant et réfléchissant sans cesse de l'énergie électromagnétique. »

- *Multi-étapes* (lorsque s'enchaînent des lois d'évolution comme celles de ^{238}U et/ou des changements d'état).
- *Plus ou moins rapide en ce qui concerne la durée d'une évolution-conséquence* (et la durée est elle-même relative, puisque variant de manière relativiste avec la vitesse de l'observateur : pour un observateur, une horloge en mouvement tourne plus lentement qu'une horloge au repos) ;
- *Stochastique*, en ce sens que nul ne peut prédire l'ordre dans lequel les noyaux d'un objet se décomposeront, ni l'instant où un noyau donné se décomposera ; la loi de décomposition s'applique à une population, pas à un de ses éléments.

Remarques sur la décomposition de noyaux atomiques et leur instabilité

La causalité qui agit dans la décomposition de noyaux ou de particules ne s'explique pas parfaitement de nos jours. Son effet se modélise cependant en faisant intervenir des mécanismes de liaison entre nucléons (=protons ou neutrons) comme la tension superficielle d'une goutte de liquide, la répulsion électrostatique (force de Coulomb), la force nucléaire (dite forte) et la force faible.

On sait malgré tout que certains noyaux lourds, synthétisés à l'origine dans des supernovas (=explosions stellaires très puissantes), ont une faible énergie de liaison par nucléon. Si un tel noyau est déformé - par exemple par un choc ou par une forte agitation thermique de ses nucléons - la répulsion entre ses protons amplifie la déformation : le noyau lourd a tendance à se rompre. Et comme une décomposition de noyau se fait avec perte de masse, donc dégagement d'énergie et augmentation de l'entropie, il peut y avoir fission spontanée.

L'instabilité énergétique n'est pas une cause agissante, *c'est une propriété* ; et la conséquence - qui n'apparaît qu'au bout d'un certain temps, d'ailleurs variable - n'agit pas sur un noyau ou une particule donnée, mais statistiquement sur un nombre de noyaux ou de particules. Nous touchons là aux limites des postulats de causalité et de déterminisme, certaines propriétés des évolutions-conséquences étant imprévisibles au niveau atomique ; la solution philosophique est l'existence des lois d'interruption dans le cadre du Déterminisme général. Pour le moment retenons que :

> **« Certains effets déterministes ne peuvent être décrits que par des lois statistiques portant sur l'effectif d'une population et sur des durées ».**

4.5 Décohérence quantique

Ce chapitre est complété dans l'annexe par le chapitre Physique quantique - Mécanique quantique et les chapitres suivants.

Définition

Une décohérence est une transformation irréversible, fondamentalement différente de l'évolution réversible, régie par l'équation de Schrödinger qui l'a précédée : c'est une transition d'état faisant passer le système de l'état instable de superposition à un des états quantiques qui constituaient celle-ci. C'est un cas de transformation où l'imprédictibilité intervient par Déterminisme statistique, sous forme de choix d'un des états composants de la superposition, état qui seul lui survit.

Autre exemple d'imprédictibilité, les fluctuations quantiques sont des phénomènes sans cause préalable qui ne sont pas des évolutions, parce qu'ils résultent

d'indéterminations intrinsèques (instabilité due au Principe d'incertitude de Heisenberg) échappant au concept même de causalité.

Instabilité

Une superposition d'états se décompose assez vite en interagissant avec son environnement, par exemple sous forme d'échange de chaleur. Voir l'article *Du monde quantique au monde macroscopique : la décohérence prise sur le fait* [200]. Plus le système est grand et lourd, plus il est instable. C'est pourquoi on ne constate jamais d'état superposé macroscopique.

> **« La superposition d'états ne peut être stable qu'à l'échelle atomique. »**

Réduction de la fonction d'onde

Le passage d'une superposition d'états à un de ses états réduit cette superposition à un état unique stable, visible à l'échelle macroscopique. Il réduit la fonction d'onde cohérente du système complet (objet en états superposés + dispositif de mesure) à celle d'une valeur propre particulière d'une observable du dispositif, d'où le nom de *décohérence* : il choisit l'une des valeurs propres, correspondant à l'un des objets superposés, lui attribue les paramètres globaux de l'objet initial comme la masse-énergie et la charge électrique, et le laisse subsister de façon stable à l'échelle macroscopique. Il est impossible de prévoir lequel des objets superposés sera choisi, car on ne peut décrire avec précision les paramètres de la perturbation macroscopique infligée à la superposition à l'état atomique par la décohérence, perturbation qui crée l'état unique observé à partir de la superposition.

> **« Un objet macroscopique est dans un état quantique unique et stable. »**
> (Sauf lorsque sa matière est instable, par exemple par radioactivité.)

Au point de vue dualité onde-particule, la réduction de la fonction d'onde supprime le comportement ondulatoire des variables qui les rendait incertaines ou instables, ne laissant subsister que l'état macroscopique sans incertitude ni instabilité.

4.6 Multiplicité des résultats d'évolution

La superposition des états d'un système résultant d'une évolution existe aussi sous forme de valeurs probabilistes de variables, comme la position ou l'impulsion (masse x vitesse). Une particule qui s'est déplacée se trouve *simultanément*, au temps *t*, non pas à une mais à une infinité de positions voisines.

Probabilité de présence au point Q – Densité de probabilité

Chacune des positions d'une particule, par exemple au point *Q*, est affectée d'une densité de probabilité de présence *p(Q)* décrivant la probabilité de présence de la particule dans un volume *dV* autour de Q par le produit *p(Q)dV*.

On peut interpréter la multiplicité des positions d'une particule en fin d'évolution :

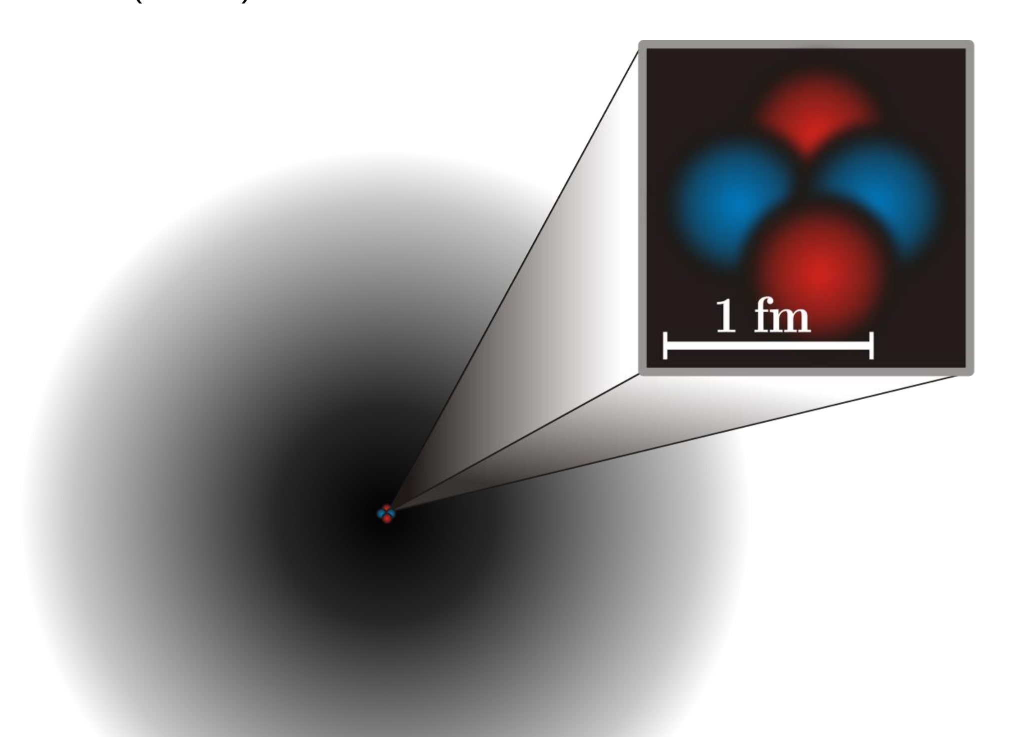
1. soit comme une présence la plus probable là où la densité de probabilité est la plus élevée ;
2. soit comme une présence simultanée dans tout l'espace, donnant une image floue mais plus nette là où la densité de probabilité est la plus élevée ;
3. soit comme les diverses positions possibles si l'on refait l'expérience un grand nombre de fois, certaines étant plus probables que d'autres. C'est là une

prédiction probabiliste de position dont il existe une loi équivalente pour les vitesses :

« A l'échelle atomique, les positions et les vitesses sont probables, jamais certaines. »

Exemple
Dans la figure ci-dessous, la densité de probabilité de présence des deux électrons du nuage électronique d'un atome d'hélium ^{2}He dans une petite zone est d'autant plus forte que cette zone est plus foncée (qu'elle comprend plus de points). Le noyau (2 protons + 2 neutrons) est au centre.

Le carré en haut à droite représente la densité de probabilité de présence des deux protons dans le noyau. Un atome d'hélium a une taille de l'ordre de l'angström (10^{-10} m), tandis que son noyau est 100 000 fois plus petit, avec une taille de l'ordre du fermi (10^{-15} m).



Atome d'hélium : densité de probabilité de présence des 2 électrons autour du noyau
© Wikimédia Commons

Voir aussi, en annexe : Rappels sur la loi de Gauss (lecture non indispensable).

4.7 Les indéterminations de la Mécanique quantique

A un instant donné, non seulement la position d'une particule est imprécise, mais sa vitesse l'est également.

« A un instant donné la position et la vitesse sont probabilistes, donc imprécises et incertaines. »

Principe d'incertitude de Heisenberg

Pire encore, il est impossible de connaître simultanément avec précision la position *x* et la quantité de mouvement (impulsion) $p=mv$ selon un axe de référence quelconque d'une particule de masse *m* et vitesse *v* : le produit de leurs imprécisions Δx et Δp a une borne inférieure donnée par le Principe d'incertitude de Heisenberg, démontré en Mécanique quantique. Cette loi s'écrit :

$$\Delta x \,.\, \Delta p \geq ½\hbar \quad \text{où } \hbar=\frac{h}{2\pi}$$

h étant la constante de Planck h=6.626.10^{-34} joule**.**seconde

et $\hbar$ ("h barre") est une constante telle que $\frac{1}{2}\hbar$ = 0.527.10^{-34} joule.seconde.

La masse étant toujours constante en Mécanique quantique, car non-relativiste, c'est la vitesse qui est d'autant plus imprécise que la précision sur la position est grande, et réciproquement.

> **« Cette limitation n'est pas due à une imprécision des méthodes de mesure adoptées, c'est un principe fondamental de la nature. »**
> (Ce principe est une limite supérieure de précision, imposée aussi bien aux choix arbitraires simultanés de position et de vitesse, qu'à la reproductibilité de résultats de mesures simultanées successives.)
>
> **« Ce principe décrit donc aussi une instabilité de la nature. »**

Voir aussi :

- Principe d'incertitude de Heisenberg ;
- Il y a d'autres couples de variables soumises à la même limitation.

4.8 C'est la mesure qui crée son résultat ; avant il n'existait pas

Il faut bien comprendre que l'évolution d'un système à l'échelle atomique crée un ensemble de résultats, pas un résultat particulier. De même qu'en mathématiques on ne confond pas un ensemble et un de ses éléments, en physique quantique une évolution crée un ensemble de résultats potentiels, virtuels ; *avant la fin (en superposition) de cette évolution le résultat mesuré n'existe pas encore* :

> **« C'est la mesure qui crée le résultat, en le choisissant parmi les éléments de l'ensemble de résultats virtuels superposés créé par l'évolution. »**
>
> **« Contrairement à la physique macroscopique, aucune observable de physique quantique n'a une valeur indépendamment de sa mesure. »**

Il est important de comprendre que la mesure *crée* le résultat, elle ne *révèle* pas un résultat préexistant. Ce qui préexiste est l'ensemble des résultats *possibles* de l'évolution, ensemble de valeurs propres d'une observable qui a la masse de départ du système avant évolution.

Cette évolution, régie par l'équation de Schrödinger, crée cet ensemble en superposition, tous ses éléments existant ensemble et partageant une même énergie et d'autres propriétés (ce qu'on appelle la cohérence). Ce que la Mécanique quantique affirme et que l'équation de Schrödinger produit est cet état superposé, réalité de la masse-énergie qu'on peut mettre en évidence à l'aide de dispositifs expérimentaux ad hoc [200].

Ce résultat est donc un état *virtuel* de la matière, impossible à voir car :

- Il n'a pas été matérialisé par une interférence avec l'environnement du système ;
- Une telle interférence ne peut créer, par décohérence, qu'un état existant de la matière correspondant à une des valeurs propres possibles.

4.9 Valeurs propres orthogonales et interférences

Source [301].

La superposition d'états produite par l'évolution selon l'équation de Schrödinger n'est pas visible : on n'en verra l'état choisi qu'après une interaction avec l'environnement, par exemple lors d'une mesure. Il y a alors deux cas :

- Ou les états quantiques en superposition sont indépendants (on dit "orthogonaux") et l'interaction a produit une des valeurs propres possibles, dans un état physique visible à l'échelle macroscopique (dans la molécule d'ammoniac l'atome d'azote sera au-dessus ou en dessous du plan des trois hydrogènes ; le chat de Schrödinger sera ou mort ou vivant) ;
- Ou ces états quantiques interfèrent entre eux parce qu'ils ne sont pas indépendants, ce qui change la distribution de leurs probabilités d'occurrence. L'interaction a encore produit une des valeurs propres possibles ; l'effet des interférences a simplement changé les probabilités de ces valeurs propres. Cette distribution de probabilités différente est la seule manifestation des interférences, les états finaux possibles étant les mêmes qu'en son absence.

4.10 Processus du choix de l'état décomposé d'une superposition

Le déroulement physique du choix de l'élément de l'ensemble de résultats virtuels de l'évolution dépend du dispositif de mesure, il n'y a pas de règle générale. Mais dans tous les cas il fait intervenir de l'énergie, il n'est pas neutre ; et cette énergie est suffisante pour être cause d'un résultat visible à l'échelle macroscopique.

Exemple : un photon est détruit par son impact sur une cellule photoélectrique, qui produit un signal électrique au résultat visible. Cette destruction est la seule façon de le « voir ».

Dans tous les cas, la mesure amplifie l'énergie qu'elle échange avec le dispositif expérimental dont elle fait partie : sans cette amplification l'homme ne pourrait rien voir, ses sens n'étant pas assez sensibles. Or cette amplification met en jeu une énergie beaucoup plus importante que celles de l'échelle atomique, énergie qui ne fait pas partie de l'expérience, qui n'est pas intervenue dans l'évolution de celle-ci, et dont la loi d'évolution ne peut donc tenir compte. Et comme il est impossible de mesurer cette énergie perturbatrice, l'élément qu'elle choisit dans l'ensemble qu'est la superposition d'états est imprévisible : voilà pourquoi des gens qui ne connaissent pas l'explication précédente parlent à tort de *valeur au hasard.*

> **« L'équation de Schrödinger est déterministe, mais au sens statistique. Elle produit un ensemble de résultats virtuels, à partir desquels il faut ensuite choisir par une interférence non déterministe avec l'environnement macroscopique. »**

A l'échelle atomique toute mesure perturbe le système mesuré

Pour fournir un résultat visible, une mesure utilise un dispositif macroscopique. Or ce dispositif ne peut pas ne pas échanger de l'énergie (par exemple un photon) avec l'objet qu'il mesure, énergie qui fait donc nécessairement partie de l'expérience. Celle-ci doit donc être conçue pour en tenir compte.

« A l'échelle atomique toute mesure perturbe le système mesuré. »

« On ne peut "voir" un photon qu'en l'absorbant dans un dispositif macroscopique. »

4.11 Les deux sortes de changements physiques : les transitions et les évolutions

La nécessité d'échanger de l'énergie pour mesurer quelque chose est une conséquence du fait qu'il n'y a que deux sortes de changements physiques :

- Les *transitions* (changements d'état) comme le gel de l'eau, la décohérence ou la décomposition radioactive, qui ne sont visibles que par l'intermédiaire de photons porteurs d'énergie dont la capture perturberait l'expérience à l'échelle atomique ;
- Les *évolutions proprement dites*, toujours continues et accompagnées d'un échange d'énergie.

**« Il n'y a que deux sortes de changements physiques :
les changements d'état et les évolutions proprement dites. »**

4.12 Tout transfert d'informations suppose un transfert d'énergie

A l'échelle atomique, un rayon lumineux minimum (un photon unique transportant l'information minimum, 1 bit) réfléchi par un miroir transfère une impulsion à ce miroir, donc une énergie qui compte à cette échelle ; et réciproquement, tout transfert d'information suppose un transfert d'énergie. C'est pourquoi les physiciens affirment que :

« Tout transfert d'informations suppose un transfert d'énergie et réciproquement. »

Donc :

« Toute évolution qui conserve l'énergie d'un système conserve aussi son information descriptive et réciproquement. »

Voir [302] et dans [0] *Principe de conservation de l'information d'un système fermé*.

Les films d'anticipation, qui parlent d'une machine qui « lit toute l'information d'un objet, notamment une personne », pour la transférer instantanément à des années-lumière de distance où un récepteur peut reconstituer l'objet physique ou la personne, parlent d'une impossibilité physique : on ne peut transférer de l'information sans transférer de l'énergie, et la Relativité a démontré que l'énergie ne peut voyager plus vite que la lumière.

4.13 Définition du Déterminisme statistique

Le Déterminisme restreint des lois de Newton et de Maxwell ne pouvant régir toutes les évolutions physiques, notamment celles de l'échelle atomique et des systèmes dynamiques (chaotiques), nous en avons défini une extension : le *Déterminisme statistique*. C'est une doctrine selon laquelle l'évolution dans le temps d'une situation

sous l'effet des lois de la nature est régie par le postulat de causalité et la règle de stabilité (comme le Déterminisme restreint), mais *l'application de ces lois peut donner des résultats à distribution stochastique* : la prédictibilité est statistique, elle implique le choix d'un état final (à l'échelle atomique après décohérence d'une superposition d'états).

Le déterminisme le plus simple, qui permet à la fois la compréhension, la prévision et la prédiction d'une évolution est le Déterminisme restreint. Le Déterminisme statistique n'existe que pour les évolutions à résultats multiples appartenant à un ensemble défini au début de l'évolution.

Lois d'évolution régies par le Déterminisme statistique

Le Déterminisme statistique est un sur-ensemble du Déterminisme restreint, en plus duquel il régit des lois d'évolution dont le résultat est un ensemble d'états :

- Dont les éléments sont prédictibles :
  - Chacun avec une probabilité d'occurrence, dans le cas des ensembles discrets ; exemple : 2 états équiprobables dans le cas de l'ammoniac ;
  - Chacun avec une densité de probabilité d'occurrence, dans le cas des ensembles continus (voir *Probabilité de présence au point Q – Densité de probabilité*).
- Dont les éléments :
  - Soit sont des états finaux d'une évolution itérative périodique, allant vers des attracteurs ou à prédictibilité statistique (voir Chaos) ;
  - Soit coexistent en superposition cohérente avant de subir une décohérence ; celle-ci choisit un des éléments de manière nécessairement imprédictible (comme pour l'ammoniac) ;
  - Soit ont déjà subi par décohérence un choix stochastique produisant un élément unique (comme dans le cas d'un lancer de dé).

En plus des lois d'évolution macroscopique conservatives régies par le Déterminisme restreint, le Déterminisme statistique régit les lois de l'échelle atomique. Il régit pour cela les outils de calcul que sont la Mécanique quantique, dont l'équation fondamentale est celle de Schrödinger. Il régit aussi l'Electrodynamique quantique et la Chromodynamique quantique, qui correspondent à des échelles subatomiques. Il régit, enfin, les systèmes dynamiques (Chaos).

Continuité et ininterruptibilité : définitions

La continuité est, pour nous, une propriété des fonctions d'évolution.

Une fonction numérique $f(x)$ définie sur un intervalle I est continue au point x_0 si $f(x) \to f(x_0)$ quand $x \to x_0$. (Le symbole $\to$ signifie « tend vers »).

Une telle fonction n'existe que lorsque l'évolution est soumise à une loi, mais lorsqu'elle existe son application est ininterruptible tant que sa cause existe.

L'ininterruptibilité qualifie la conséquence d'une cause suffisante : tant que la cause existe sa conséquence est certaine, elle ne peut être interrompue.

Affirmer l'ininterruptibilité affirme l'existence d'une conséquence, mais pas nécessairement que cette conséquence est une évolution soumise à une loi ; il pourrait, par exemple, s'agir d'un changement d'état qui se poursuivra tant que sa

cause existera. Tant que la température de l'eau est 100°C l'eau bout et n'arrêtera pas de bouillir tant que sa température sera celle-là.

Postulat de continuité (ininterruptibilité)
La continuité d'une cause entraîne celle de la loi d'évolution qui en résulte. Si une cause suffisante a pour conséquence l'application d'une loi d'évolution, cette loi doit rester active aussi longtemps que sa cause, ni plus ni moins, d'où le postulat de continuité :

> **« Toute loi d'évolution s'applique aussi longtemps que sa cause suffisante existe ; aucune interruption n'est possible) »**

4.14 Le Déterminisme statistique régit aussi les transitions d'état

La radioactivité, évoquée précédemment, provoque des décompositions qui ont un caractère à la fois prévisible et imprédictible. La liste des éléments produits par la décomposition d'un noyau ou d'une de ses particules (neutron dans cet exemple) est parfaitement prévisible, ainsi que les émissions de rayonnements qui l'accompagnent :

> **« Une décomposition de particule n'est pas une évolution, mais sa transformation en un ensemble connu d'autres particules. »**

Conclusion métaphysique

> **« L'état d'un système peut avoir pour conséquence un changement d'état (décomposition, fusion, liquéfaction, etc.), et pas seulement une évolution continue. »**

4.15 Structure hiérarchique des lois du déterminisme

Changements de phase de l'eau

Considérons une casserole d'eau chauffée par un brûleur. L'apport de chaleur de celui-ci fait monter la température de l'eau à une vitesse qui dépend de la masse de l'eau et de sa *capacité calorifique*, vitesse dont nous appellerons la loi *Vliquide*

Lorsque sur le même brûleur la température atteint 100°C, elle reste constante, mais l'eau se transforme en vapeur à une vitesse donnée par une loi *Vébullition*, où la capacité calorifique de la loi précédente est remplacée par la *chaleur latente de vaporisation*.

Si, à pression constante et en fournissant la même quantité de chaleur par unité de temps, on chauffe de la vapeur d'eau au-delà de 100°C, sa température s'élève en suivant une troisième loi de vitesse, *Vvapeur*.

Dans cette expérience de pensée, l'eau de la casserole est passée par 3 causes d'échauffement successives, chacune avec sa loi de vitesse. D'où les conclusions :

> **« L'évolution d'un objet peut passer par des phases successives, chacune avec sa loi d'évolution. »**

> **« Il existe dans la nature des conditions de changement de loi d'évolution ou d'alternance entre une évolution et une transition d'état. »**

Nécessité de lois conditionnelles

Une condition régissant l’entrée en vigueur ou l’arrêt d'application d’une loi d'évolution ou de transition d'état est d'un niveau hiérarchique supérieur à elle. Cette condition est d'une nature fondamentalement différente de la loi d'évolution ou de transition qu'elle régit ; elle effectue *un test* de la forme :

<Si telle condition est remplie>
Exemple : si la température de l’eau a atteint 100°C

et en tire *une conséquence* de la forme :

< Si le résultat est OUI, effectuer ou empêcher l’action *A* >
Exemple : arrêter l'application de la loi *Vliquide* et lancer l'application de *Vébullition*.
< Si le résultat est NON, effectuer ou empêcher l’action *B* >.

Lois de transformation : évolutions et changements d'état

Un système peut subir des évolutions et des transitions (changements) d'état. Pour désigner indifféremment l'une ou l'autre, nous parlerons de *transformation* ; il sera alors question de *lois de transformation*. Et pour que ces lois soient déterministes, nous postulerons que toute transformation de système respecte la Règle de stabilité.

Lois d'interruption

Les lois déterministes lançant ou interrompant l'application d’une loi de transformation seront appelées *lois d'interruption*.

Selon les circonstances (état, environnement) d’un système, une loi d'interruption permet ou empêche, démarre ou interrompt l'application à ce système d'une loi de transformation. Et chaque lancement d’une loi de transformation lui fournit un état initial du système : la loi d'interruption « lui passe les paramètres et variables d’exécution dont elle a besoin ».

> **« Une loi d'interruption est la cause efficace de la transformation qu’elle lance ou arrête. »**

Fonction de veille des lois d'interruption

L'application d’une relation causale est évidemment instantanée : dès que la cause d’une transformation existe, sa loi s’applique ; et dès que la cause n’existe plus, sa loi ne s’applique plus : c’est là une contrainte de *veille*. La nature dispose ainsi d’une multitude de fonctions de veille, pour les objets inanimés comme pour les êtres vivants.

Nous ajouterons donc au postulat de déterminisme cette fonction de veille, comme nous lui avons ajouté celle de conditionnalité dont elle est le complément indispensable.

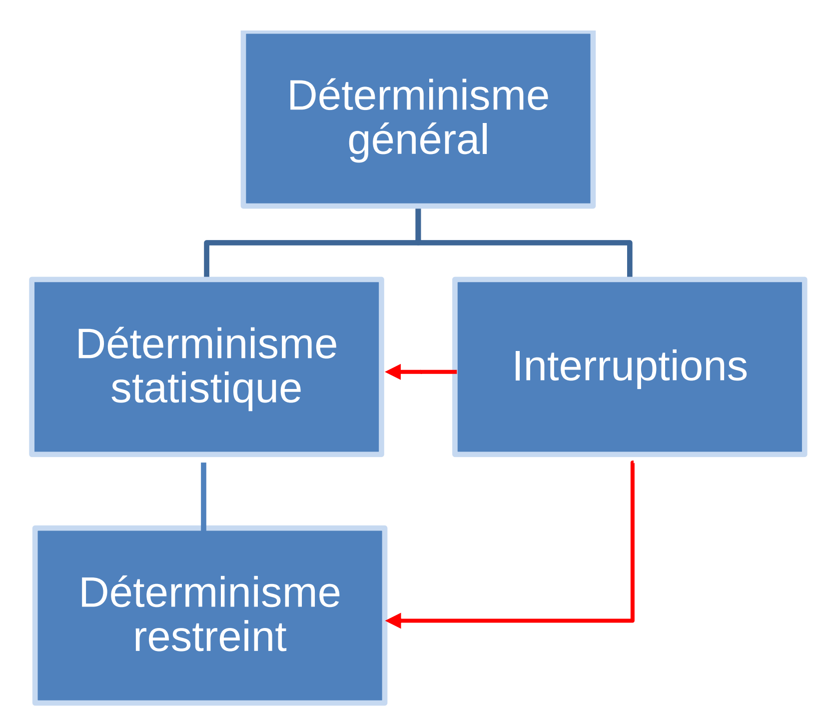
Nouvelle définition du déterminisme

A ce point de l’exposé, notre définition du déterminisme est devenu :

> **« Le déterminisme est une doctrine selon laquelle la transformation causale de tout système conservatif est régie par trois postulats :**
>
> - **Le postulat de causalité ;**
> - **La règle de stabilité ;**
> - **La fonction d’interruption s’appuyant sur celle de veille. »**

Un déterminisme à niveaux hiérarchiques

Nous savons qu'en tant qu'ensemble de postulats, le déterminisme de la nature comprend deux sous-ensembles interdépendants : le Déterminisme statistique des lois d'évolution et de changement d'état, et les lois d'interruption. Le Déterminisme statistique comprend lui-même un sous-ensemble, le Déterminisme restreint. Cette structure logique est une hiérarchie, dont nous appellerons le sommet le *Déterminisme général*.



Structure hiérarchique provisoire du déterminisme

4.16 Conditions nécessaires pour des résultats prédictibles uniques

Pour qu'une loi d'évolution de la nature produise un résultat prédictible unique, son caractère déterministe ne suffit pas : savoir qu'un résultat déterministe ne garantit pas son unicité, sa calculabilité et sa précision.

A - Il faut d'abord un algorithme de prévision de l'évolution à partir de l'état initial

Définition d'un algorithme

Un algorithme est un raisonnement rigoureux. C'est une suite d'étapes de calcul (numériques ou logiques) et de tests de condition permettant si nécessaire des sauts à une étape autre que la suivante. C'est donc la description d'un raisonnement en un langage de programmation. Tout programme d'ordinateur exécute des algorithmes ; réciproquement tout algorithme est programmable pour exécution dans un ordinateur.

Postulat 1 : toute loi de transformation est algorithmique

L'existence d'une loi de transformation déterministe implique l'existence d'un algorithme de prévision de l'évolution qui suit l'état initial du système, méthode rigoureuse qui garantit sa calculabilité informatique ; mais cette *prévision d'évolution* ne garantit pas *la prédiction de résultats numériques*. Exemples d'algorithme :

1. La deuxième loi de Newton reliant la force ***F*** (vecteur), la masse sur laquelle elle agit *M* et l'accélération $\boldsymbol{\gamma}$ (vecteur) communiquée à cette masse est : $\boldsymbol{F} = \boldsymbol{M\gamma}$.

L'accélération étant la dérivée seconde de la position par rapport au temps, un calcul de la loi de position met en œuvre une équation différentielle.

Le respect d'une équation (ou d'un système d'équations) différentielle(s) est caractéristique d'une évolution, et présent dans l'expression mathématique de toutes les lois d'évolution régies par les déterminismes restreint et statistique. Toutefois certaines *lois itératives* (dont nous verrons des exemples plus bas) sont déterministes sans utiliser d'équation différentielle.

2. Une fonction itérative comme $f(x) = rx(1-x)$ permettant de calculer les termes successifs d'une suite $x_{n+1} = rx_n(1-x_n)$ connaissant le coefficient r et la valeur initiale x_0. On rencontre une telle suite dans un système dynamique.
Voir *Exemple n°2 : Fonction logistique*.

3. Un système d'équations différentielles comme celui du modèle de système dynamique de Lotka-Volterra (voir [0]).

D'où le postulat :

« Toute loi de transformation est algorithmique. »

Postulat 2 : tout raisonnement logique est algorithmique. »
Le caractère algorithmique des lois de transformation est un cas particulier de ce second postulat. La puissance d'un raisonnement logique est celle de ses jugements, elle-même basée sur la possibilité de formuler des critères et de vérifier si une proposition les satisfait. Tout critère basé sur des données représentables dans un ordinateur peut y faire l'objet, dans un algorithme, d'un jugement de la forme :

<Si> condition <Alors> proposition 1 (ou calcul 1) <Sinon> proposition 2 (ou calcul 2)

Un algorithme est écrit en un langage informatique. C'est une suite d'étapes de raisonnement comprenant des jugements permettant de poursuivre l'exécution à l'étape suivante ou à une autre étape, ou de la terminer.

Exemples : un calcul de gestion de stocks, un calcul de Mécanique quantique, une stratégie de jeu d'échecs, une démonstration de théorème et un logiciel d'intelligence artificielle sont des ensembles d'algorithmes.

« Tout raisonnement logique est algorithmique. »

B - Il faut ensuite que l'évolution qui suit l'état initial soit unique

- L'exemple 1 précédent donne un résultat d'évolution unique pour chaque état initial. Mais à l'échelle atomique, où l'évolution d'un système est décrite par l'équation de Schrödinger, les résultats sont des variables stochastiques : la position ou la vitesse d'une particule en mouvement ne sont pas uniques, elles dépendent d'une loi de probabilité. Bien que l'équation de Schrödinger soit déterministe, l'interprétation probabiliste de ses résultats empêche leur unicité, tout en leur imposant des contraintes d'appartenance à un ensemble prédéfini, condition qui les empêche d'être « au hasard » ; le passage de l'ensemble transitoire de résultats superposés à un résultat unique a lieu par choix non déterministe lors de la décohérence.

  La Mécanique quantique, outil mathématique des évolutions à l'échelle atomique, définit un modèle de déterminisme plus riche que le Déterminisme restreint de la physique classique : le *Déterminisme statistique*.

- Les exemples 2 et 3 ci-dessus donnent parfois des résultats multiples tels qu'une oscillation périodique entre plusieurs états successifs, ou une évolution vers un cycle limite « attracteur » (voir Chaos), etc.

  Une évolution déterministe produit donc parfois des résultats multiples calculables, éventuellement prédictibles avec des valeurs limites. Ses résultats sont alors soumis au Déterminisme statistique.

Remarque sur l'unicité de l'évolution de l'Univers
L'exigence d'unicité est postulée pour le modèle d'évolution de l'Univers entier par le Déterminisme philosophique de Laplace et l'espace-temps de la Relativité d'Einstein. Laplace (astronome) et Einstein (physicien cosmologiste) avaient en tête l'univers déterministe (au sens restreint) des phénomènes astronomiques. L'unicité implique l'existence d'une chaîne de causalité unique reliant les situations du passé, du présent et de l'avenir.

Cette chaîne de causalité unique de l'enchaînement des situations qui ont existé est un sous-ensemble des chaînes de causalité de l'arborescence des situations possibles, compte tenu des superpositions d'états, des incertitudes de position et vitesse et des transitions d'état imprévisibles. Des possibilités multiples sont apparues chaque fois qu'un résultat d'évolution (ou de transition d'état) a été un élément d'un ensemble de solutions parmi lesquelles la nature a fait un choix imprévisible, par exemple le choix d'un des états d'une superposition par une interaction avec l'environnement.

Aucune prédiction de résultat n'est possible au-delà d'un nœud d'arborescence : le choix de la branche suivie est parfois fonction de processus non déterministes comme la date d'une décomposition radioactive d'atome ou des raisonnements de l'inconscient humain. Et l'homme agit sur la nature, parfois avec la brutalité d'une explosion atomique. Conclusion :

> **« L'évolution globale de l'Univers n'est pas déterministe. »**

C - Il faut, enfin, que le résultat prédit par calcul soit précis
Du point de vue logique, il faut qu'un résultat d'évolution prédit représentant une grandeur physique puisse être bon, que sa valeur ne soit pas gâchée par de l'imprécision, de l'indétermination ou de l'ambigüité.

Cette exigence est incompatible avec la Mécanique quantique, dont les résultats sont entachés d'incertitude probabiliste. En outre, même à l'échelle macroscopique, nous verrons que certaines évolutions présentent une *sensibilité aux conditions initiales* qui limite la précision d'un résultat et son horizon de prédiction, même quand les calculs et les données initiales sont précis. D'où la conclusion :

> **« Le déterminisme d'une loi d'évolution ne garantit pas la précision de ses états futurs, bien que ceux-ci dépendent d'une loi. »**

Complément : voir au chapitre *Hasard* le paragraphe *Le déterminisme ne garantit pas la prédictibilité*.

4.17 Déterminisme des processus itératifs

Systèmes dynamiques

Les processus itératifs décrivent les évolutions de *systèmes qualifiés de dynamiques*. Ils constituent une alternative aux processus continus (ininterrompus) des lois d'évolution macroscopiques de la nature. Cette alternative a été conçue pour modéliser des évolutions intrinsèquement discontinues, comme celle d'une population connue seulement par des statistiques annuelles. Pour parler de *l'évolution d'un système dynamique* on parle de *sa dynamique*.

Définition d'un processus itératif

Un processus itératif est une succession d'étapes, dont le déroulement et le résultat sont tels que :

- Le déroulement est régi par une loi calculable définie par l'homme ; cette loi définit, pour tout rang *n* donné, le terme de rang *n+1*, qui ne dépend que du terme de rang *n* et du terme initial (*n*=0 ou *n*=1); la loi d'évolution est donc déterministe.
- Le résultat de chaque étape est défini à la fin de cette étape (et pas pendant son déroulement) ;
- L'étape initiale se déroule à partir des conditions initiales, puis les résultats de chaque étape servent de conditions initiales pour l'étape suivante.

Exemple 1
Considérons la suite de nombres dont le 1er terme est 1 et le terme de rang *n*+1 est défini à partir de son prédécesseur par la formule $\boldsymbol{x_{n+1}} = \frac{1}{2}(\boldsymbol{x_n} + \frac{2}{x^n})$.

Les termes successifs sont : 1; ½(1+2/1)=1.5; ½(1.5+2/1.5)=1.4166, etc.
Lorsque *n* tend vers l'infini ($n \to \infty$) $x_n \to 1.4142135\ldots$ qui est la valeur de $\sqrt{2}$.

Un tel processus est déterministe, car son déroulement est géré par une loi et ne dépend que de la condition initiale $n_1=1$.

Exemple 2
Une population a une croissance naturelle de 1.5% par an, mesurée par des statistiques annuelles. Cette croissance entraîne une consommation croissante d'une ressource naturelle limitée (comme l'eau), consommation mesurée chaque année en même temps que la population. Connaissant la limite de la ressource et la population initiale (de l'année zéro), calculer son évolution à court terme (années 1, 2, 3…) et à long terme.

Une évolution itérative bornée peut produire 4 sortes de résultats et 4 seulement

Nous verrons en étudiant le *chaos* que l'évolution d'un tel processus déterministe itératif peut, selon le cas, produire après un grand nombre d'itérations :

- un résultat unique fini ;
- ou un résultat infini ;
- ou une oscillation asymptotique entre un nombre fini de résultats ;
- ou une suite infinie de résultats uniques.

4.18 Chaos : sensibilité aux conditions initiales et amplification

Dans cette section nous allons étudier le cas particulier important où le caractère itératif d'une évolution est dû à sa non-linéarité.

Fonction linéaire ou non-linéaire

Par définition, une fonction *F(x)* de la variable *x* est linéaire si et seulement si, lorsque *x* est multiplié par *k*, *F(x)* l'est aussi. Cela s'écrit :

$$F(kx) = kF(x)$$

Bien entendu, si *x* est divisé par *k, F(x)* l'est aussi : $F(\frac{x}{k}) = \frac{F(x)}{k}$.

Une fonction non-linéaire met en jeu, par exemple, une puissance de la variable, un produit de variables comme *xy* ou certaines fonctions comme *cos(x)*.
Exemples de fonctions non linéaires : x^2, *cos(x)*, *xy*, e^x (où *e* = 2.71828…).

Chaos

Le mot chaos évoque la désorganisation, l'imprédictibilité. S'agissant de systèmes physiques ou artificiels qui évoluent, le caractère chaotique vient de ce que leurs équations descriptives d'évolution *déterministes* ont pourtant des solutions imprédictibles. Ce phénomène est abordé au chapitre *Hasard*, paragraphe *Le déterminisme ne garantit pas la prédictibilité*. Une des raisons de l'imprédictibilité des systèmes chaotiques est leur *sensibilité aux conditions initiales*, décrite ci-après.

Nous verrons aussi que cette imprédictibilité n'est pas totale : les prédictions sont possibles dans le cadre de statistiques, les fonctions prédites étant stochastiques. Les évolutions des systèmes dynamiques sont donc régies par le *Déterminisme statistique* ; il y a là une analogie avec les évolutions en Mécanique quantique, régies également par le Déterminisme statistique.

Une première définition du chaos

Par définition, le chaos caractérise un phénomène déterministe de manière négative :

- Il empêche la prédiction d'états futurs un peu lointains ;
- Il amplifie des imprécisions expérimentales.

Problème des trois corps, exemple de sensibilité aux conditions initiales

Une orbite planétaire perturbée

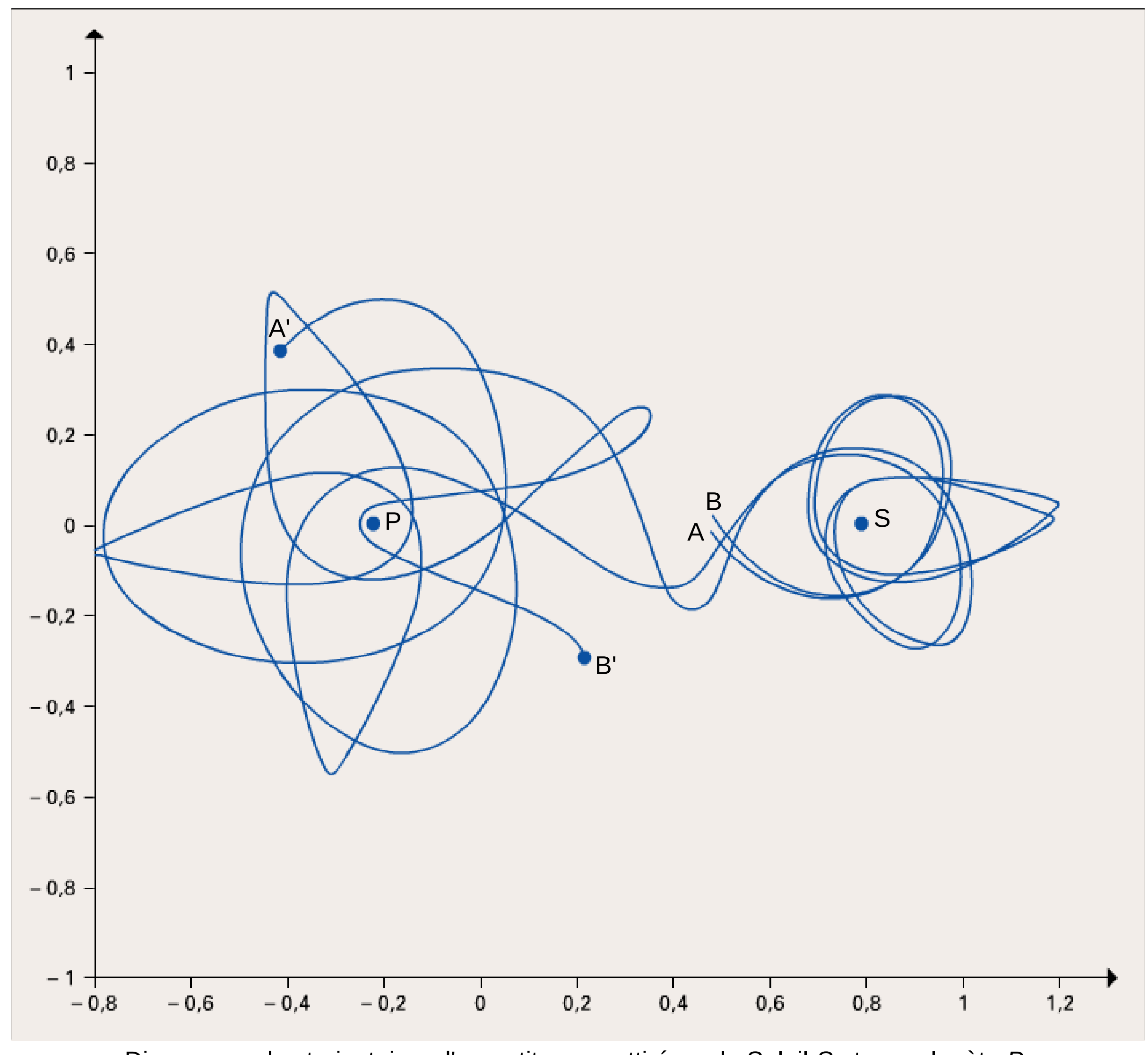
Le problème proposé en 1885 par le roi Oscar II de Suède et Norvège, avec un prix au premier scientifique qui le résoudrait, concerne un phénomène conservatif à évolution chaotique. Il s'agissait de savoir si le système solaire était stable à long terme, par exemple sur des millions d'années, ou si un corps (planète ou astéroïde) pouvait changer d’orbite par attraction d’un autre corps ou entrer en collision avec lui, tomber sur le Soleil, être éjecté hors du système, bref changer d'orbite de manière significative.

Le gagnant du prix, le mathématicien français Henri Poincaré, étudia les propriétés générales des solutions éventuelles de ce problème. Il en montra la complexité et approfondit le cas simple où il n'y avait que 3 corps - par exemple deux gros comme le Soleil et une planète, et un très petit par rapport à eux comme un satellite - cas appelé depuis « Problème des trois corps ». Il montra que même dans ce cas simple *les orbites sont trop complexes pour être décrites par une formule explicite*.

Pour résoudre ce problème, Poincaré dut approfondir une branche des mathématiques, la *topologie algébrique*, qui étudie les transformations continues d'objets géométriques en utilisant des structures algébriques. Il résuma les solutions générales du problème astronomique posé dans une nouvelle discipline, dont il posa les bases : la *Théorie des systèmes dynamiques*.

Au XXe siècle, d'autres mathématiciens complétèrent les travaux de Poincaré, montrant que *dans certains cas l'évolution d'une orbite peut être imprévisible, découverte qui remit en cause la définition du déterminisme admise à l'époque*.

Voici un exemple d'évolution chaotique issu de [177] : le mouvement du corps céleste « petit » du problème des 3 corps. Le graphique ci-dessous représente, dans un référentiel où l'axe horizontal passe par les centres du Soleil *S* et d'une planète *P*, et l'axe vertical est une perpendiculaire quelconque au premier, deux trajectoires *A→A'* et *B→B'* du petit corps lorsque celui-ci est parti de points *A* et *B* très voisins. On voit que ces deux trajectoires divergent, la distance finale *A'B'* étant bien plus grande que la distance initiale *AB* : elle a été amplifiée.



Divergence des trajectoires d'un petit corps attiré par le Soleil *S* et une planète *P*

On connaît aujourd'hui des évolutions chaotiques dans de nombreux domaines : la dynamique des fluides, la météorologie, la chimie des réactions dissipatives et même la Mécanique quantique. Notons qu'une évolution chaotique peut concerner un système conservatif aussi bien qu'un système dissipatif.

Evolution itérative

La non-linéarité exige une recherche numérique de la limite à l'infini, par itérations successives. Le caractère non linéaire de l'évolution d'une fonction chaotique interdit, en général, d'en donner une formule permettant un calcul en fonction du temps de la forme *F(t)*.

Le principe du calcul de l'évolution d'un tel système a été illustré dans l'exemple précédent $x_{n+1} = \frac{1}{2}(x_n + \frac{2}{x^n})$. On calcule *numériquement*, par itérations successives aux instants t_0, t_{0+h}, t_{0+2h}…, la valeur de ses variables *x(t)*, *y(t), z(t)…* et leurs variations pendant un court intervalle de temps *h* grâce à leurs dérivées. L'évolution des systèmes dynamiques est donc décrite par une suite d'étapes de calcul dont chacune a pour point de départ le résultat de la précédente. Ce principe de calcul est déterministe, en tant que suite d'étapes déterministes.

Définition complète d'un système dynamique à évolution chaotique

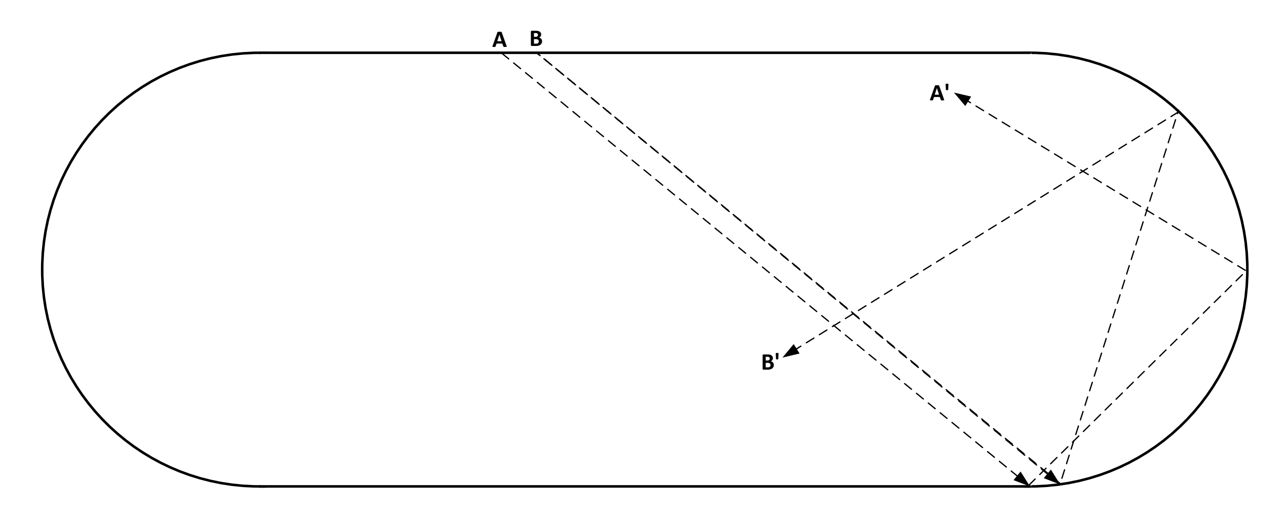
On dit qu'un système dynamique a une évolution chaotique si et seulement si, considérant une suite itérative d'états *i* de sa variable x_i :

1. Cette suite est telle que la fonction d'évolution soit de la forme $x_{n+1} = f(x_n)$ où l'état *n+1* ne dépend que de l'état précédent *n* : la fonction d'évolution (la suite des états) est donc déterministe ;
2. La suite des états est apériodique : (aucune partie de la suite d'états n'existe plus d'une fois) ;
3. La suite est bornée inférieurement et supérieurement : (les valeurs de la fonction d'évolution sont comprises entre un minimum et un maximum) ;
4. Le système dynamique est sensible aux conditions initiales : (une variation - même petite - des conditions initiales de la loi d'évolution du système produit, à plus ou moins long terme, des variations significatives et imprévisibles de la fonction : le système dynamique est donc un amplificateur non linéaire).

Exemples

1 - Sensibilité aux conditions initiales

Considérons un billard qui a deux côtés arrondis suivant le schéma ci-dessous. Supposons que deux billes soient lancées dans des directions parallèles de deux points voisins *A* et *B*. Lorsqu'elle rencontre une paroi, une bille rebondit en faisant un angle exactement opposé à celui qu'elle fait avec la normale à la paroi au point de contact. Or la bille partie de *A* touche la paroi opposée dans sa partie rectiligne et celle partie de *B* la touche au début de sa partie ronde. Les tangentes à la paroi de ces deux points d'arrivée n'étant pas parallèles, les trajectoires finales *AA'* et *BB'* sont très différentes.

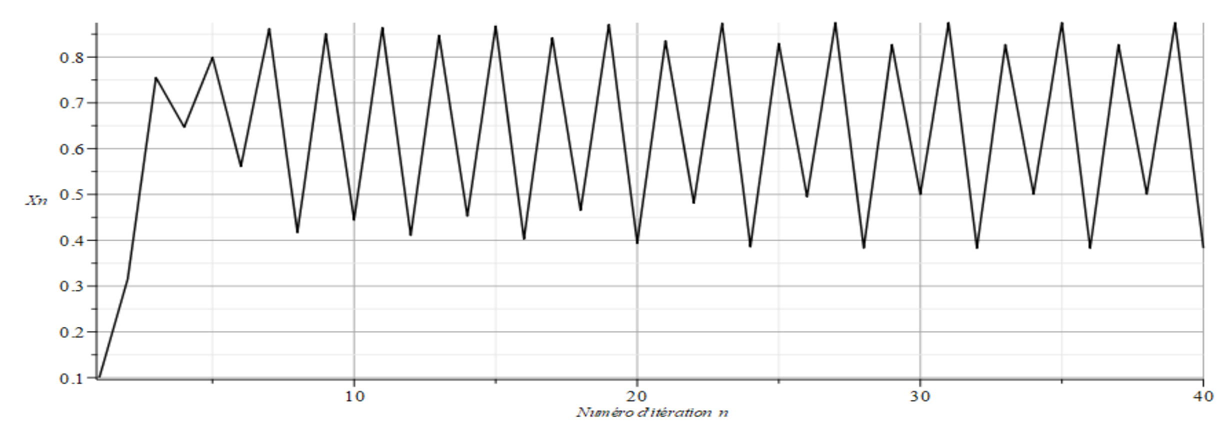


Dans cet exemple de sensibilité aux conditions initiales il n'y a pas eu d'itération, mais seulement non-linéarité.

2 - Fonction logistique $f(x) = rx(1-x)$ où $0 \leq x \leq 1$ et $r \leq 4$

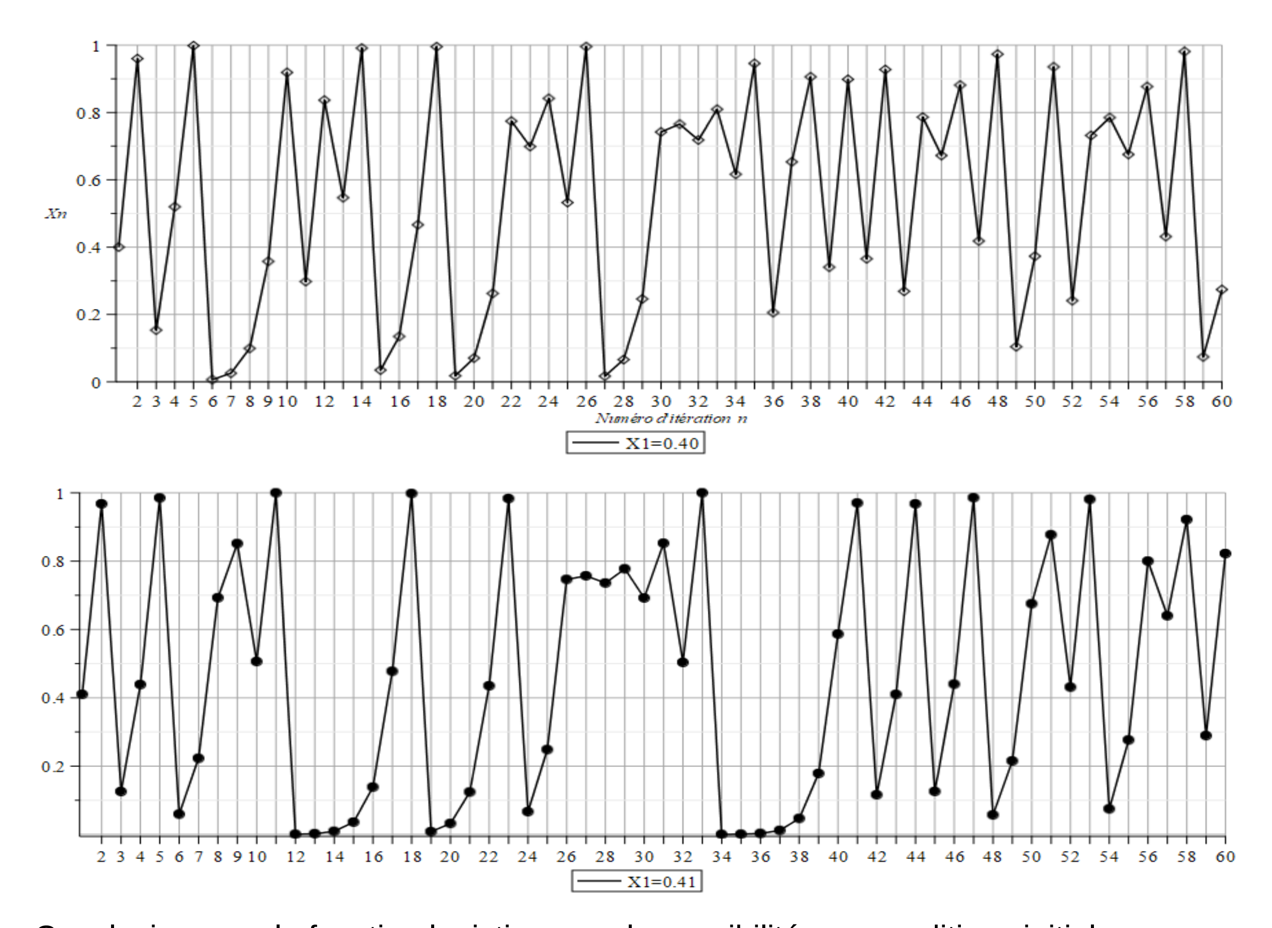
- La variable *x*, définie entre 0 et 1, représente le rapport entre une population effective, une année donnée, et un maximum arbitraire ;
- La fonction logistique *f(x)* en calcule la valeur (la population) après une période de temps prise pour unité ; ce calcul se fait par itérations successives (voir paragraphe suivant).
- Le paramètre *r* représente la vitesse de croissance de la population. Sa valeur maximum est 4, pour que la fonction ne croisse pas indéfiniment lorsque le nombre d'itérations croît.

a) Evolution de la fonction logistique avec *r*=3.5



On voit qu'à partir de l'itération 30 il y a une *oscillation de période 4* : les valeurs successives de x_n du graphique semblent se reproduire toutes les 4 itérations.

b) Evolution de la fonction logistique avec *r*=4.0 pour deux valeurs initiales proches : x_1=0.40 et x_1=0.41. On voit qu'à partir de l'itération 6 la différence est significative.



Conclusion pour la fonction logistique sur la sensibilité aux conditions initiales
Avec *r=4*, la fonction logistique est sensible aux conditions initiales : *au bout de quelques itérations elle amplifie une petite différence initiale*. On ne peut donc prédire son état final que si la précision de son état initial est infinie, ou pour un intervalle de valeurs initiales infiniment étroit ; et on ne peut prédire avec précision l'état que pour un nombre réduit d'itérations, c'est-à-dire pour un *avenir proche*.

Cette évolution apériodique se produit quelle que soit la valeur initiale de *x* lorsque *r=4*. Et les valeurs successives, apériodiques, chaotiques, sont toutes distinctes : une valeur déjà obtenue ne se reproduira jamais. Cette unicité est évidente : à partir d'un état donné (*i* de x_i donné) il n'y a qu'une seule évolution possible (une seule valeur de la fonction logistique), conformément au postulat déterministe.

Fonction logistique : diagramme des bifurcations

La période de la fonction logistique (nombre de valeurs formant un groupe répétitif après un grand nombre d'itérations) dépend de la valeur du paramètre *r*. Un programme simple MAPLE [145] permet de représenter graphiquement l'ensemble des valeurs finales ($n \to \infty$) de la fonction logistique en fonction de *r*.

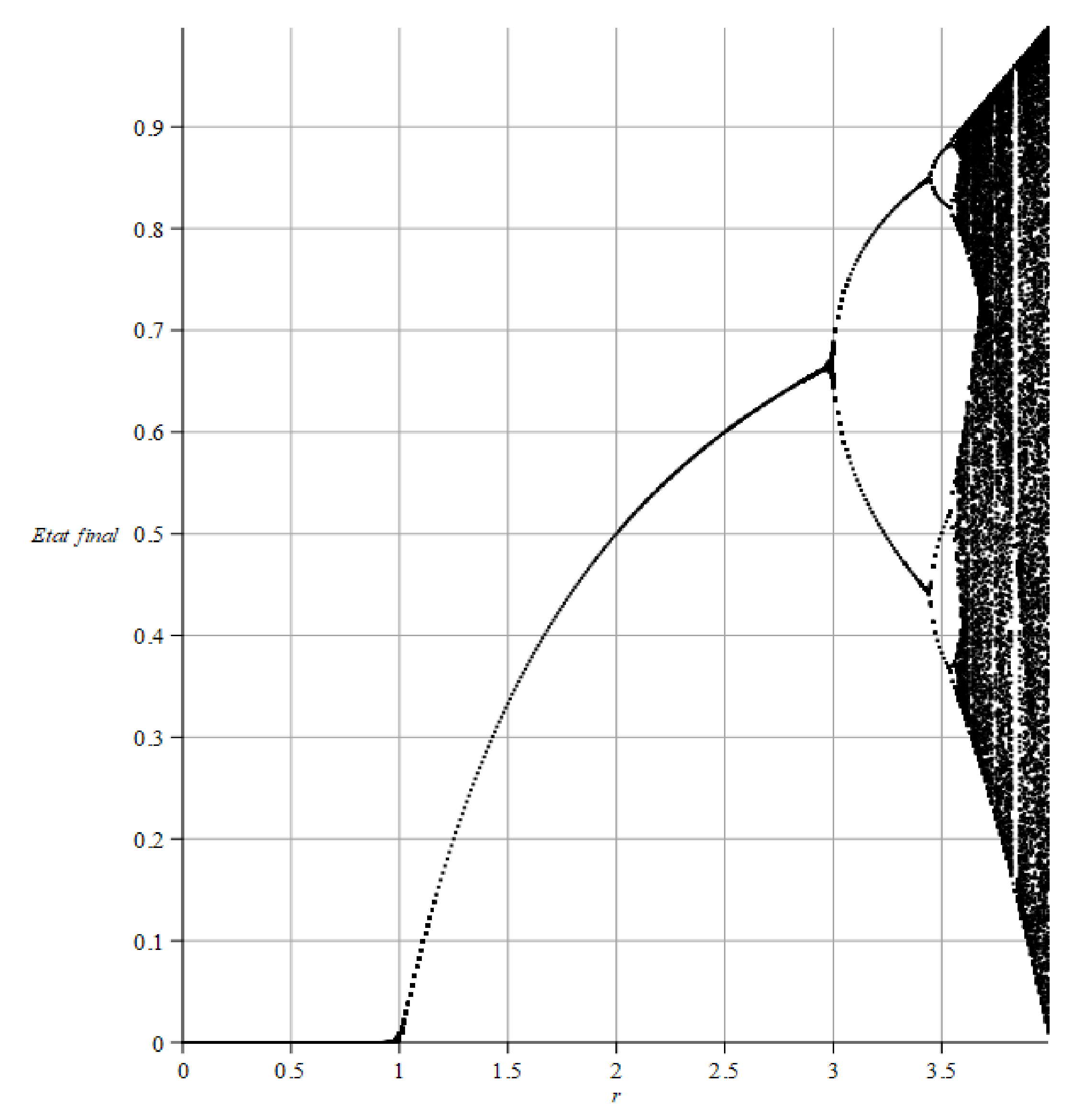


Diagramme des bifurcations : état final de la fonction logistique en fonction de *r*

Remarques

- Pour 0≤r≤1, la valeur finale est zéro.
- Pour 1<r<3, il y a une seule valeur finale.
- Pour 3≤r<3.46 environ, il y a une période de deux valeurs finales.
- Pour 3.46≤r<3.544 environ, il y a une période de quatre valeurs finales.
- Pour 3.544≤r<3.5644 environ, il y a une période de huit valeurs finales.
- Pour r>3.5644 il y a une courte période de seize valeurs finales, jusqu'à environ 3.5687 où commence une période de 32 valeurs.

4.19 Déterminismes sans cause

Nous avons vu que la notion de hasard (défini comme l'absence *démontrable* de cause ou de loi) est une abstraction commode, que l'homme qui ignore quelque chose utilise pour rejeter la responsabilité de son ignorance ou de certains actes.

Logiquement, on ne peut pas *prouver* qu'un phénomène constaté, dont on ignore la cause ou la loi, n'en a pas. N'attribuons donc jamais un phénomène au hasard.

« En physique il n'y a pas de hasard. »

En matière d'évolution, la notion de hasard s'oppose au *déterminisme causal*, celui qui intervient dans les déterminismes que nous avons déjà vus. Mais elle s'oppose aussi aux *déterminismes sans cause* des phénomènes suivants.

Déterminisme dû à l'instabilité

Nous avons vu que la décomposition radioactive spontanée de certains noyaux atomiques est due à leur instabilité. Celle-ci est régie par la loi statistique de la demi-vie, elle n'est pas au hasard. L'instabilité n'est pas une cause à résultat unique comme celle du Déterminisme restreint : elle produit une distribution statistique d'effets ; sa loi d'évolution est un exemple de Déterminisme statistique.

Déterminisme dû à l'imprécision

Le Principe d'incertitude de Heisenberg limite la précision de mesures simultanées de certains couples de variables, comme la position et la vitesse, ou l'énergie et la durée. Il traduit une *loi de limitation de la nature*, dont le déterminisme est d'un autre type que celui, causal, du Déterminisme restreint : c'est un déterminisme de l'imprécision, de la relation imposée entre les incertitudes sur les mesures simultanées des variables de certains couples. Il intervient constamment dans le Déterminisme statistique.

Déterminisme dû aux particularités mathématiques

Certaines évolutions sont surprenantes par les comportements qu'impose leur modèle mathématique. Ainsi, les évolutions chaotiques, bien que déterministes parce que calculables avec une précision arbitraire, s'avèrent imprévisibles à long terme par sensibilité excessive aux conditions physiques initiales, dont la connaissance ne peut jamais être parfaite. Après un certain temps d'évolution, cette sensibilité peut amplifier considérablement des différences minimes entre deux valeurs initiales.

Exemple de processus déterministe à résultat non calculable
Source : [B67] page 243.

Les équations différentielles de propagation d'onde sont déterministes au sens traditionnel : leurs solutions sont telles que les données de l'instant initial déterminent complètement l'onde à tout instant ultérieur.

Or il existe des cas où une solution a des données initiales calculables et des valeurs ultérieures non calculables ; dans une telle solution à un problème physique déterministe, certaines fonctions ont des valeurs tantôt calculables, tantôt non calculables.

[B123] cite un exemple d'onde définie par sa fonction de propagation dont l'amplitude à l'instant t=0 est calculable et l'amplitude à l'instant t=1 est continue mais non calculable.

« Le résultat d'une formule ou d'un processus physique déterministe peut être non calculable, ou tantôt calculable tantôt non calculable.
(La non-calculabilité n'empêche pas l'évolution, elle empêche seulement de prédire son résultat.)

Et pourtant la nature n'hésite pas : à partir de tout état initial elle déclenche immédiatement une évolution conforme à sa loi d'interruption !

Nombres réels non calculables
Il existe des nombres réels *non calculables*. Un exemple de procédé pour prouver l'existence d'un tel nombre (sans le calculer) est cité dans [B67] page 108 ; ce nombre a une infinité de décimales telle que sa décimale de rang *n* est définie comme prenant la valeur 1 ou la valeur 0 selon que la *machine de Turing* de rang *n* calculant sur le nombre *n* s'arrête ou non, ce qu'il est impossible de savoir d'avance au moyen d'un algorithme (impossibilité démontrée par Turing). [B268]

On peut être pris de vertige en songeant à un nombre réel (bien nommé, car il existe vraiment) qu'on ne peut écrire parce qu'on ne peut le calculer !

Conclusion

« Il y a 4 déterminismes opposés du hasard : 1 causal et 3 sans cause. »

5 Déterminisme général

Nous construisons ici un déterminisme capable de régir toutes les lois de transformation conservatives de la physique, le *Déterminisme général*. Postuler un tel déterminisme a un préalable : l'adhésion au réalisme de la science moderne, dont voici un résumé.

5.1 Doctrine réaliste moderne

Un réaliste pose aujourd'hui deux postulats :

1. Il existe une réalité indépendante de la connaissance de l'homme ;
2. Cette réalité est intelligible : l'homme peut donc la découvrir et en décrire les lois. La connaissance que l'homme acquiert de la réalité (par perception, intuition, entendement et raisonnement) est digne de confiance jusqu'à preuve du contraire. Cette position s'oppose à celle de l'idéalisme, prisonnier de l'allégorie de la caverne (Platon), qui considère la réalité comme à jamais inconnaissable.

Opposition fondamentale entre réalistes et idéalistes

La différence entre réalistes et idéalistes est que les premiers font a priori confiance à leur aptitude à connaître la réalité, alors que les seconds en nient a priori la possibilité.

Le réalisme est difficile à définir et à soutenir à l'échelle atomique
A l'échelle atomique nous ne pouvons rien voir, ou à peu près rien même avec de puissants microscopes. Nous remplaçons alors cette vision par la représentation des objets (particules et ondes) et de leur évolution que nous en donne notre Mécanique quantique : nous "voyons" à travers des équations dont nous interprétons les résultats. Et un gros problème apparaît alors : leur caractère probabiliste.

Beaucoup de gens, Einstein par exemple, considèrent ce caractère comme incompatible avec le réalisme ; Einstein allait même jusqu'à rejeter la Mécanique quantique, qu'il considérait comme une solution provisoire, à remplacer par une solution réaliste dès qu'on la trouverait.

Controverse doctrinale opposant le réalisme et l'antiréalisme
La controverse doctrinale a commencé à l'époque de Platon et Aristote, entre l'idéalisme du premier (pour qui la réalité est une Idée dont un objet physique n'est qu'une copie) et le réalisme de son disciple Aristote (pour qui la réalité est ce qu'on voit et l'Idée intelligible est une abstraction inutile). Elle a continué entre la doctrine antiréaliste de Niels Bohr et Heisenberg et la doctrine réaliste d'Einstein et de De Broglie. Le réalisme d'Einstein peut lui-même être considéré comme une variante de l'Idéalisme transcendantal de Kant, variante qui abandonne la notion d'Idée réelle comme l'aurait fait Aristote. La controverse doctrinale entre réalisme et antiréalisme se poursuit de nos jours.

Selon [313] pages 9 et suivantes il y a deux façons d'être réaliste, selon la réponse à la question suivante : "Le monde naturel se compose-t-il uniquement des types d'objets que nous discernons lorsque nous regardons autour de nous, et de leurs constituants ?" Autrement dit : "Ce que nous pouvons voir constitue-t-il la totalité de l'Univers ?"

- Ceux qui répondent oui à cette question – appelons-les « réalistes naïfs », c'est-à-dire « sans complication » n'ont pas besoin de justifications sophistiquées pour décrire le monde et les transformations de ses objets.

  Exemple de théorie relevant du réalisme naïf : une théorie des atomes décrite dans [313], c'est une théorie distincte de la Mécanique quantique et plus complète qu'elle. Voir aussi [183].

- Ceux qui répondent non croient en une réalité cachée existant en plus de celle sur laquelle tout le monde est d'accord ; l'auteur de [313] appelle leur doctrine "réalisme magique".

  Exemple de réalité cachée : les multivers décrits dans [0] et [203-1].

Il est évident que les descriptions scientifiques de l'Univers entier et des transformations de ses objets doivent pouvoir se passer le plus possible de réalités cachées, dont l'existence ne pourra jamais être justifiée et dont l'inexistence est également indémontrable. Ainsi, il y a aujourd'hui une théorie qui décrit le détail du déroulement du Big Bang, le faisant sortir de sa catégorie « phénomène caché » : la *Gravitation quantique à boucles*, qui constitue un pont entre la physique de l'échelle macroscopique (qui comprend la Relativité générale) et la Mécanique quantique de l'échelle atomique.

5.2 Synthèse procédurale de plusieurs lois d'évolution

Le mouvement d'un bouchon flottant à la surface de l'eau d'un torrent dépend simultanément des lois de Mécanique des fluides et des lois de Newton. La nature fait constamment et instantanément la synthèse de toutes les lois qui s'appliquent à un système donné, quel qu'il soit, quelle que soit sa complexité et quelles que soient les circonstances. Tout se passe comme si la nature exécutait un algorithme de transformation prenant en compte toutes les circonstances possibles.

> **« La nature fait constamment et instantanément la synthèse des lois de transformation qui s'appliquent à un système donné. »**

En fait, c'est l'homme qui invente des lois réductrices régissant une partie seulement d'un phénomène ; même si (en vertu du *réalisme*) il pense avoir découvert des lois naturelles existant indépendamment de lui, c'est bien lui qui les imagine, puis les vérifie et les met au point jusqu'à ce qu'elles n'aient pas de contre-exemple.

On peut aussi postuler que la nature n'a qu'*une Loi de synthèse globale* régissant tous les systèmes conservatifs possibles, quel que soit le nombre de lois partielles humaines qui s'appliquent simultanément à un système donné. C'est une loi trop compliquée pour nous, mais compte tenu du pouvoir illimité de synthèse de la nature (penser au mécanisme cellulaire basé sur l'ADN) on peut en postuler l'existence.

> **« Postulat : la nature a une loi de synthèse globale régissant la transformation de tout système, conformément à la Règle de stabilité. »**

Ce pouvoir de synthèse fera nécessairement partie de la définition du Déterminisme général que nous sommes en train de compléter par étapes.

<u>La nature est complète</u>

On doit aussi postuler que la nature *est complète* : elle ne manque jamais de loi d'évolution ou de transition d'état, parce qu'on ne constate jamais de non-

transformation lorsque les circonstances sont une cause efficace de transformation, et qu'on ne constate jamais de « transformation erronée » contredisant des lois connues.

> **« Postulat : dans la nature toute évolution ou transition d'état est régie par une loi, conformément à la Règle de stabilité. »**

Cette complétude fera aussi partie du Déterminisme général.

Méthode pour une application conditionnelle des lois de transformation

La seule manière de prendre en compte tous les ensembles de circonstances possibles dans une décision de lancer ou arrêter une loi d'évolution, est d'utiliser un algorithme comprenant le nombre d'étapes de raisonnement nécessaires, avec des conditions de la forme :

> « Si <la condition *C* est satisfaite> Alors <appliquer la loi *L* avec ses paramètres [*P*], ou interrompre *L*> ».

Exemple : Changements de phase de l'eau

Quelle que soit la complexité d'une transformation à étapes successives, la détection des conditions de changement de loi d'évolution est faite ainsi par la nature.

5.3 Transformations déclaratives et transformations procédurales

Un processus décisionnel ou de transformation à plusieurs étapes peut donc avoir deux formes :

- Soit la liste des étapes est indépendante des données initiales, et elles sont toutes parcourues du début à la fin, dans l'ordre prédéfini ; le processus est alors à sens unique, il est dit *déclaratif*.
- Soit l'ordre des étapes et leur omission éventuelle dépend des données initiales et/ou des données calculées jusqu'à chaque étape où une décision d'exécution ou d'omission est prise ; le processus est alors dit *procédural*. Exemple de raisonnement procédural : l'algorithme des changements d'état de l'eau.

  Il est important de savoir que la simple lecture de la liste des étapes d'un algorithme ne peut fournir son résultat ou sa conclusion, qui dépendent des réponses aux tests <Si> <Alors> <Sinon> calculées pendant l'exécution.

  « Pour avoir les résultats d'un algorithme il faut l'exécuter du début à la fin. »

5.4 Règles de lancement et d'interruption des lois de transformation

Nous avons défini une transformation naturelle soit comme une évolution, soit comme une transition d'état. On doit donc maintenant postuler que :

> **« Toutes les lois de transformation que l'homme peut définir sont soumises à des conditions de lancement ou d'arrêt descriptibles par des algorithmes. »**
> (Un algorithme est la description d'un raisonnement en langage de programmation.)
>
> **« Pour tout état donné, une transition d'état est toujours suivie d'une évolution. »**

« Une évolution peut être suivie d'une bifurcation choisissant une nouvelle loi d'évolution parmi plusieurs possibles ».

« La nature gère automatiquement et instantanément tous les cas de transformation de tous les systèmes, dans toutes les circonstances si complexes soient-elles, avec les lois de synthèse appropriées. »

« Tout système conservatif est régi par une même *Loi globale d'évolution*, dont les lois de transformation humaines sont des vues cohérentes réduites à des circonstances particulières. »

5.5 Complémentarité des lois d'évolution et d'interruption

D'après ce qui précède, toutes les lois physiques possibles appartiennent à une (et une seule) des deux catégories suivantes :

1. Les lois d'évolution au sens large, comprenant les lois descriptives, les lois de transformation (évolution, décomposition, fusion, transition d'état), et de manière générale toutes les lois physiques conservatives avec échange d'énergie ;
2. Les lois conditionnelles, comme les lois d'échauffement de l'eau de l'exemple précédent ou la loi de décomposition radioactive de l'uranium 238. On appellera ces lois *lois d'interruption :*
   - Elles lancent ou interrompent l'application d'une loi d'évolution ;
   - Ou elles provoquent une transition d'état.

   Les lois d'interruption s'appliquent simplement en testant des conditions, sans échange d'énergie. Dans la nature, ces tests sont effectués en permanence, pour détecter un changement de causalité dès qu'il se produit, ou pour empêcher qu'un changement indésirable ait lieu ou qu'une situation indésirable survienne (comme dans le cas du Principe d'incertitude de Heisenberg).

Ces deux catégories de lois sont complémentaires : une loi d'évolution ne se conçoit pas sans loi d'interruption qui en déclenche ou interrompt l'application ; et une loi d'interruption n'existe que pour régir des lois d'évolution.

Début et fin de l'action d'une loi d'évolution

« Tout changement de cause suffisante est régi par une loi d'interruption. »

« Une transformation se poursuit, régie par la même loi, tant qu'une loi d'interruption n'intervient pas pour déclencher l'application d'une autre loi d'évolution. »

- L'interruption d'un changement d'état déclenche toujours une évolution ;
- L'interruption d'une évolution déclenche soit une autre évolution, soit une transition d'état ;
- Une interruption peut être interrompue par une autre qui est prioritaire, mais elle ne déclenche jamais une autre interruption.

Exemple 1
Quand on chauffe de l'eau liquide à pression constante, sa température croît tant qu'elle n'a pas atteint le point d'ébullition ; la poursuite du chauffage entraîne une ébullition à température constante tant qu'il reste du liquide ; elle entraîne ensuite une élévation de température de la vapeur. Il y a dans cette expérience 3 lois d'évolution différentes séparées par 2 lois d'interruption ; et il y a 3 capacités calorifiques (en

joules/kg et par degré) : celle de l'eau liquide, celle de la vaporisation et celle de la vapeur.

Exemple 2
A l'échelle atomique, lorsqu'une évolution décrite par l'équation de Schrödinger a produit une superposition d'états, celle-ci persiste jusqu'à ce qu'une intervention extérieure ayant la violence d'un phénomène de l'échelle macroscopique (comme une mesure) vienne la perturber ; la superposition est alors détruite (il y a décohérence) et l'évolution du système perturbé se poursuit avec un seul des états précédemment superposés. La décohérence n'est pas une évolution, c'est une transition d'état comme le gel d'un liquide, mais sans échange d'énergie.

5.6 Lois globales d'interruption, de transformation et du déterminisme

Toute loi de transformation (évolution ou transition d'état) s'applique et cesse de s'appliquer du fait de lois d'interruption, et seulement du fait de ces lois. On peut donc postuler que l'ensemble des lois d'interruption, déjà connues par l'homme ou non, constitue dans la nature une *Loi globale d'interruption* qui fait une synthèse cohérente de ces lois, synthèse applicable à toutes les situations : tout se passe comme si toutes les transformations naturelles étaient régies par une *Loi globale du déterminisme* comprenant une *Loi globale de transformation* et, grâce à la Loi globale d'interruption, toutes les conditions d'application nécessaires.

La loi globale de transformation comprend toutes les lois du Déterminisme général , donc aussi celles du Déterminisme statistique et donc celles du Déterminisme restreint.

Capacité d'interruption algorithmique

Cette Loi globale du déterminisme comprend un algorithme d'interruption qui supervise les circonstances pour détecter les causes suffisantes de lancement ou arrêt de transformations. L'algorithme lance aussi l'application de chaque loi de transformation avec les conditions initiales appropriées. Enfin, il effectue les synthèses nécessaires lorsque des causes multiples exigent de multiples lois de transformation.

Conformément à la doctrine réaliste, l'homme ne fait que découvrir et énoncer, progressivement, les diverses lois de transformation applicables à des circonstances suffisamment réductrices pour lui. Toutes ces lois supposent des systèmes conservatifs, condition nécessaire du déterminisme lui-même imposée par la Règle de stabilité.

Remarque : le déterminisme ne considère que des systèmes conservatifs
Il n'y a pas de loi d'évolution appliquée à un système dissipatif, faute de pouvoir décrire fidèlement les échanges ou pertes d'énergie et de matière : on commence toujours par considérer un système comme conservatif, puis on lui applique des corrections.

Classification des lois de Newton en tant que lois d'évolution ou lois d'interruption

- La 2ème loi et la loi de gravitation sont des lois d'évolution, car elles s'appliquent à des forces susceptibles de causer des accélérations.
- La 1ère loi et la 3ème loi sont des lois d'interruption, car elles décrivent des conditions sources de contraintes.

5.7 C'est l'homme qui définit les lois de la nature, et il les définit sans exception

(Citation de la *Critique de la raison pure* de Kant [20], page 194)
"L'ordre et la régularité [conformité aux lois de la nature], c'est donc nous-mêmes qui les introduisons dans les phénomènes que nous appelons nature, et nous ne pourrions les y trouver si nous ou la nature de notre esprit ne les y avaient mis originairement. Car cette unité de la nature doit être une unité nécessaire, c'est-à-dire certaine a priori, de la liaison [par causalité] des phénomènes. Or, comment pourrions-nous instaurer a priori une unité synthétique, si, dans les sources originaires de connaissance de notre esprit, ne se trouvaient contenus a priori des principes subjectifs d'une telle unité [comme le postulat de déterminisme et la règle de stabilité], et si ces conditions subjectives ne possédaient en même temps une validité objective, dans la mesure où elles sont les principes de la possibilité de connaître un quelconque objet dans l'expérience ?"
(Fin de citation)

A l'évidence, l'homme définit les lois de la nature selon ce qu'il devine qu'elles sont en réalité, suite à ses observations. Il vérifie ensuite que l'effet constaté de chaque loi est conforme à ses prévisions et prédictions.

Principe de la primauté de la connaissance sur les objets et phénomènes (doctrine)

Cette idée consiste à considérer comme réels les objets et phénomènes physiques observés et présents à l'esprit par leurs représentations, c'est-à-dire *à postuler que la réalité suit le modèle que l'homme en conçoit*. Elle est révolutionnaire, en ce sens qu'elle renonce à affirmer comme Platon que la réalité est inaccessible parce que l'homme n'en voit que des représentations de son esprit. Tout homme fait donc a priori confiance à ce qu'il perçoit, parce que c'est la seule réalité accessible. Mais cette confiance est provisoire, elle peut être mise en cause dès qu'une différence ou une contradiction apparaît avec une autre réalité constatée ou prévue, et il faut alors changer quelque chose dans le modèle.

L'étape initiale de la construction de cette connaissance du monde consiste à admettre des aprioris de l'esprit humain comme l'espace, le temps, les catégories de jugement de Kant (quantité, qualité, relation et modalité) et la causalité, et à élaborer notre connaissance du monde réel (objets et lois physiques d'évolution) par rapport à eux, avec des compléments faits de prédicats et de liens de relation. C'est ainsi que l'homme a construit la géométrie, en partant des concepts a priori de point, droite et cercle pour définir des figures, angles, etc. Chaque connaissance nouvelle sera construite à partir de connaissances déjà acquises et en se liant à elles.
Détails : voir *Déterminisme, chaos et cosmologie relativiste* [0] paragraphe *Principe de la primauté de la connaissance sur les objets (doctrine)*.

5.8 Conséquences de la Loi globale du déterminisme dues à la causalité

Voici les conséquences métaphysiques de la causalité, qui régit la transformation d'un système tant que ne survient pas une cause d'interruption ou de limitation :

> **« L'application d'une nouvelle causalité est une conséquence instantanée. »**
> (Des conditions d'interruption sont prises en compte sans délai) ;
>
> **« L'application d'une causalité est une conséquence ininterrompue. »**

voir : *Continuité et ininterruptibilité* ;

« L'application d'une causalité est déterministe. »
voir *Le hasard n'existe pas* ;

« L'application d'une causalité conserve l'information d'un système fermé. »

Symétrie des lois physiques par rapport au temps

Toutes les équations des lois physiques d'évolution de la physique macroscopique (qu'elles proviennent des lois de Newton, de l'électromagnétisme ou de la gravitation relativiste) ainsi que celles de la Mécanique quantique sont symétriques par rapport au temps. Elles resteraient inchangées si le temps allait du présent au passé.

L'absence de symétrie relève de lois d'interruption ; exemples : changements de phase solide ➔ liquide, décompositions radioactives, fluctuations quantiques, trous noirs.

« Les lois d'évolution conservatives sont symétriques par rapport au temps. »
(Les lois de transition d'état, même conservatives, sont souvent irréversibles.)

Toutes ces équations symétriques par rapport au temps permettent, en théorie, un déroulement inversé du temps, du présent vers le passé, et un tel déroulement vers le passé dispose nécessairement de l'information correspondante. Le déroulement normal ne l'a donc pas détruite.

« Les lois d'évolution symétriques par rapport au temps conservent l'information du passé. »

On peut retrouver cette propriété de conservation de l'information par les évolutions déterministes en se rappelant que tout transfert d'informations implique un transfert d'énergie, et réciproquement. Or, par définition, un système fermé n'échange pas d'énergie avec l'extérieur.

« Il y a des transformations sans cause dues au Principe d'incertitude de Heisenberg. »
Voir *Fluctuations quantiques dues au Principe d'incertitude de Heisenberg* ;

« Il y a des contraintes diverses d'application de la causalité. »
(Principe d'exclusion de Pauli, invariances CP et CPT, principes de conservation et de symétrie, etc. - voir *Les niveaux de déterminisme (diagramme)*);

« Le déterminisme n'entraîne pas toujours la prédictibilité des résultats d'évolution. »
Nous avons déjà vu que *Le déterminisme ne garantit pas la prédictibilité*.

Quelles caractéristiques du Déterminisme général reste-t-il à définir ?

Nous avons besoin d'un postulat de déterminisme adapté à *toutes* les évolutions conservatives de la nature. Un tel postulat doit aussi être un sur-ensemble du Déterminisme statistique, lui-même sur-ensemble du Déterminisme restreint, niveaux du déterminisme dont nous avons montré la nécessité. Nous allons construire le Déterminisme général par induction à partir de propriétés de l'Univers. Voici donc ces propriétés, en commençant par les principes métaphysiques des lois de la nature que le Déterminisme général doit mettre en œuvre.

5.9 Métaphysique des lois de la nature

Cette section définit les principes métaphysiques des lois de transformation du Déterminisme général.

Principe cosmologique

> **« L'espace de l'Univers est homogène et isotrope. »**
> (L'espace astronomique a les mêmes propriétés partout et dans toutes les directions.)

Cette affirmation est le *Principe cosmologique*, postulé pour simplifier des calculs de Relativité générale. L'homogénéité et l'isotropie de l'Univers après le Big Bang, sont confirmées avec une très grande précision par la découverte en 1965 du fond diffus cosmologique : la densité d'énergie de l'Univers primitif était la même en tous ses points, mais il se produisait (et il se produit toujours) des fluctuations quantiques dont sont nées les galaxies. La Théorie de l'inflation explique l'extrême homogénéité constatée aujourd'hui à grande échelle (~100 millions d'années-lumière et plus). (Détails : voir [0])

Uniformité des lois physiques dans tout l'espace-temps

> **« La nature que les lois physiques décrivent est uniforme. »**
> (Les lois physiques sont les mêmes partout ; elles l'ont toujours été et le seront toujours. Les lois de transformation le sont donc aussi.)

Cette uniformité de l'Univers a des conséquences fondamentales, comme la conservation de la quantité de mouvement, du moment cinétique, de l'énergie, de la charge électrique, etc.

Stabilité des lois physiques

> **« Les lois physiques sont stables (invariantes) dans le temps et l'espace. »**

On le voit en astronomie : regarder loin, à 1 milliard d'années-lumière, c'est voir à cet endroit-là ce qui se passait il y a environ 1 milliard d'années ; et on constate, alors, que les lois physiques étaient les mêmes que sur Terre aujourd'hui. Cette stabilité est l'origine de la Règle de stabilité associée au Postulat de causalité dans le Déterminisme restreint. Même lorsqu'une loi varie avec le temps il y a toujours une loi *stable* au-dessus d'elle dans la hiérarchie déterministe qui décrit ou même explique cette variation.

Exemple : le rayon de l'Univers croît ; on s'en est aperçu en 1927 en découvrant son expansion, matérialisée par une vitesse d'éloignement des galaxies lointaines qui croît proportionnellement à leur distance, en restant la même dans toutes les directions.

Puis on s'est aperçu que la loi de croissance de ce rayon variait elle-même : l'expansion de l'Univers est de plus en plus rapide.

Enfin, on a prouvé par raisonnement qu'au commencement de l'Univers, une petite fraction de seconde après le Big Bang et pendant un très court instant, sa vitesse d'expansion a été extraordinairement rapide, des milliards de milliards de fois plus rapide que la vitesse de la lumière : ce fut la phase *d'inflation*.

> **« A sa périphérie, l'expansion de l'Univers est, et a toujours été, plus rapide que la vitesse de la lumière. »**

(La vitesse d'expansion de l'espace n'est en rien limitée par celle de la lumière, car elle ne déplace ni matière ni énergie.)

Cohérence des lois physiques

« Les lois physiques sont cohérentes. »

Les lois de la nature se complètent sans jamais se contredire. Elles respectent trois principes fondamentaux de la logique : le Principe de non-contradiction, le Principe du tiers exclu et le Principe d'identité.

Elles respectent aussi le Principe d'homogénéité, dû à Aristote, qui l'a énoncé sous forme d'interdit "*On n'a pas le droit de conclure d'un genre à un autre*". Il voulait dire qu'une relation logique ne peut exister qu'entre deux objets du même genre, dont on peut énoncer une règle d'association. Voici deux exemples.

Relation de physique
Une relation ne peut exister qu'entre grandeurs de même type. Ainsi, les relations $A = B$; $A > B$ et $A \neq B$ ne sont possibles que si A et B sont tous deux des masses (ou des longueurs, ou des durées, etc.) Même condition pour l'addition $A + B$.

Autre façon d'illustrer l'exigence d'homogénéité : il n'y a aucun moyen de mesurer une masse en unités de charge électrique ou de longueur.

Cohérence des lois physiques dans l'action de l'esprit sur la matière
Cette action, estimée possible par certains idéalistes, est contraire au principe d'homogénéité. Du reste, elle contredirait la physique : une action matérielle n'est possible qu'avec un échange d'énergie, et on ne voit pas comment une pensée pourrait fournir ou absorber l'énergie mise en jeu, à part dans les muscles d'un animal.

Cette cohérence est inévitable : c'est l'homme qui fait les lois de la nature, et il vérifie pour chaque nouvelle loi qu'elle n'en contredit aucune autre.

Nous savons, en plus, que certaines lois de la nature s'appliquent à un certain niveau de détail sans jamais contredire une loi d'un autre niveau. Exemples :

- Les lois statistiques de la thermodynamique s'appliquent sans contredire les lois des mouvements et chocs des molécules.
- Le *Principe de moindre action* de Maupertuis constitue une loi globale de mouvement qui ne contredit pas les lois de proche en proche de Newton [0].

Complétude des lois de la nature

« Les lois de transformation de la nature forment un ensemble complet. »

Considérons la doctrine du réalisme, selon laquelle la nature existe et a des lois indépendamment de l'homme. On constate alors que :

- La nature a *toutes* les lois qu'il faut pour réagir à *toutes* les situations et expliquer *tous* les phénomènes : on dit qu'elle est *complète*.
(C'est l'homme qui rédige les lois qu'il découvre ; affirmer la complétude de la nature est conforme à la doctrine réaliste.)
- Il n'y a pas de situation sans loi d'évolution, loi nécessairement universelle et immuable pour que la même cause produise le même effet, partout et toujours.

L'Univers n'est vide nulle part

« L'espace-temps n'a pas de point stable ou sans influences extérieures. »

Il n'existe pas, dans l'Univers, de point dans l'espace ou d'instant dans le temps qui soit isolé, à l'abri d'influences extérieures. Tout point, à tout instant, subit l'influence de champs gravitationnels et électromagnétiques. Il y a des endroits où des rayonnements de haute énergie sont susceptibles de déclencher une transformation. Et il y a en plus, partout et tout le temps, des fluctuations quantiques d'énergie.

L'homme peut faire confiance à son expérience

« Postulat de reproductibilité de l'expérience humaine. »

Nous postulons que les mêmes causes produisent les mêmes effets, partout et toujours ; mais ces effets reproductibles sont ceux que *nous* constatons, nous hommes.

Pour Platon et Kant, les *vraies* causes et les *vrais* effets (ceux de la nature) nous sont inaccessibles, et il n'y a aucune certitude concernant l'existence de lois naturelles produisant ces effets à partir de ces causes. Selon cette doctrine-là, nous sommes donc obligés *d'imaginer* des lois déterministes permettant de *décrire, prévoir et prédire* les effets que *nous* constatons, produits par des causes que *nous* imaginons.

Nous suivrons Kant et adopterons donc l'essentiel de sa doctrine d'*idéalisme transcendantal* : c'est l'homme qui définit les lois de la nature et doit ensuite en vérifier la cohérence avec ses constatations, prévisions et prédictions. Toutefois, nous définirons l'espace et le temps non comme des formes (données) sensibles de notre intuition, mais comme le continuum d'espace-temps de la Relativité, un milieu qui a une densité d'énergie.

Cette différence est considérable. Alors que pour Kant et son idéalisme transcendantal l'espace et le temps sont des *abstractions* indispensables pour la représentation humaine des phénomènes, l'espace-temps de la Relativité est un milieu, *réalité physique* que la matière déforme.

« L'espace-temps de l'Univers n'est pas vide. C'est un milieu contenant de la masse-énergie qui déforme l'espace et le temps. »

Rien ne nous empêche de tout comprendre de la nature

« Nous postulons l'intelligibilité. »

Pour que l'homme puisse imaginer des lois d'évolution en accord avec tous les phénomènes du domaine de définition de chacune, il est indispensable que la réalité « inaccessible » de la nature nous soit intelligible. Nous postulerons donc que :

« Rien n'empêche l'homme de trouver des lois qui décrivent parfaitement les phénomènes instantanés ou évolutifs qu'il constate ; rien ne lui est incompréhensible a priori ; rien ne restreint sa liberté de connaître. »

Cette compréhension demandera souvent des efforts, du temps, de multiples itérations, de la collaboration entre chercheurs, de l'honnêteté, etc. Mais a priori aucun phénomène ne nous est incompréhensible à jamais, et nous sommes libres de chercher à le comprendre.

Cette position est conforme à celle des *Lumières* [21] et s'oppose à l'attitude d'ignorance résignée des religions qui enseignent d'accepter que « les voies du

Seigneur sont impénétrables » [201]. Elle transgresse aussi la malédiction du Péché originel. Elle s'oppose donc aux religions qui voudraient que l'homme croie leurs révélations sans les mettre en doute, en l'assurant qu'il peut avoir confiance dans sa faculté de connaissance.

La nature fait instantanément toutes les synthèses, même complexes

« Toutes les synthèses naturelles nécessaires ont lieu. »

L'homme imagine souvent ses lois à partir d'expériences dont il se forge une représentation abstraite simplifiée. Cette approche réductrice est nécessaire pour des raisons pratiques, comme pour faciliter les raisonnements. Mais les phénomènes réels évoluent le plus souvent selon plusieurs de ces lois humaines, la nature faisant spontanément leur synthèse.

L'homme raisonne aussi, en général, sur des systèmes fermés, alors que la nature ignore cette notion. Un système fermé conserve naturellement l'énergie et la charge électrique, alors que dans la nature rien ne s'oppose à des échanges. L'homme fait des hypothèses de frottements absents ou négligeables, parce qu'il ne sait pas les décrire avec assez de précision pour les soumettre à des lois déterministes ; la nature, par contre,…

La nature fait donc une synthèse spontanée de toutes les lois de transformation qui s'appliquent à une situation, synthèse procédurale régie par le Déterminisme général.

Les 3 dimensions de la complétude de l'ensemble des évolutions de la nature

« La complétude naturelle est analytique, synthétique et procédurale. »

Comprendre parfaitement un phénomène c'est pouvoir en décrire tous les aspects : son analyse (décomposition en éléments), ainsi que les relations et interactions entre ces éléments et entre le phénomène et le monde extérieur.

Nécessité de descriptions procédurales
Une telle description à la fois analytique et synthétique est souvent incomplète si elle n'est pas, en plus, procédurale.

> *Procédural*
> L'adjectif *procédural* est utilisé par les informaticiens pour décrire la logique d'un raisonnement qui comprend des tests de valeurs et des ruptures de séquence d'instructions, c'est-à-dire des instructions de type :
>
> > « Si <condition> alors <action à exécuter ou continuation à une instruction désignée> »
>
> Exemple : *Méthode pour une application conditionnelle des lois d'évolution*.

Le caractère procédural est indispensable pour tenir compte d'interactions complexes entre phénomènes, comme ceux où plusieurs lois de la nature s'appliquent simultanément et/ou successivement du fait de la synthèse naturelle. Il faut donc un algorithme, que l'homme met en œuvre dans un logiciel.

Parfois il faudra prévoir un comportement à long terme, en utilisant un raisonnement de passage à la limite ou de convergence d'une suite, opérations impossibles à partir d'analyses et de synthèses telles qu'envisagées par les philosophes comme Descartes et Kant.

Parfois il faudra conclure à l'impossibilité de prévoir à trop long terme, comme Poincaré face au problème de trajectoires d'astres dit « Des trois corps ».

La description d'une transformation naturelle quelconque doit donc être procédurale. Kant, par exemple, ne le soupçonnait pas ; et Descartes, dans son *Discours de la méthode*, limitait celle-ci à une analyse suivie d'une synthèse. Leur conception de la compréhension des phénomènes naturels était statique, alors que la nôtre est dynamique. Cette erreur a limité leur représentation de la conséquence d'une cause à une situation, au lieu d'une transformation.

Le déroulement procédural des transformations exige interruptions et veille

> **« Déclenchée par la fonction de veille, une interruption lance ou arrête une transformation. »**

Nous avons défini une transformation comme une évolution ou un changement d'état affectant un système conservatif, transformation régie par une loi.

Nous savons aussi que l'action des lois de transformation a lieu sous contrôle de lois d'interruption qui assurent la veille, le déclenchement et l'arrêt d'évolutions ou de changements d'état.

Fonction de veille : supervision des transformations des systèmes
La nature déclenche et arrête chaque évolution *instantanément* lorsque les circonstances l'exigent. Elle a donc une *fonction de veille* qui détecte les conditions de lancement ou d'interruption d'une loi de transformation, et toute transformation est déclenchée selon une loi avec les valeurs initiales de paramètres conformes aux circonstances.

> Logiciel système d'exploitation d'un ordinateur
> En informatique un *système d'exploitation* comme Windows, Unix ou Android est un programme qui a ces fonctions de veille, arrêt et lancement de programmes d'application avec passage de paramètres. Il assure aussi toutes les fonctions d'entrée, sortie et mémorisation de données.
>
> L'action du système d'exploitation en réponse à une situation détectée électroniquement (comme la frappe d'un caractère au clavier ou l'arrivée d'un message Internet) est appelée *interruption* : elle consiste à analyser l'événement détecté et à décider du « réveil » (lancement avec passage de paramètres) ou de l'arrêt d'un ou plusieurs programmes d'application ou d'entrée-sortie. Ses processus d'analyse et de décision sont évidemment des algorithmes écrits en un langage de programmation.

La nature a donc une fonction de veille qui soumet les lois d'évolution à des règles. En dehors des règles de lancement et arrêt il y a aussi des règles de limitation, comme la conservation de l'énergie d'un système fermé, de sa quantité de mouvement, de son moment cinétique et de sa charge électrique ; le Principe d'incertitude de Heisenberg, etc.

La nature est donc l'ensemble des lois de l'Univers, notamment ses lois de transformation, en tous ses points et à tout instant. Nous postulerons donc l'existence d'un ensemble synthétique de ces lois, la *Loi globale d'interruption.* Nous en distinguerons au besoin telle ou telle partie applicable à un système particulier sous le nom de *loi d'interruption* : la Loi globale d'interruption sera donc l'ensemble synthétique

des lois d'interruption, qui en assure des synthèses cohérentes chaque fois que c'est nécessaire.

En résumé la nature a deux types de lois : les lois de transformation et les lois d'interruption. Ces lois sont complémentaires, aucune loi d'un type ne pouvant exister sans une loi de l'autre. Leur applicabilité et leur unité globales et synthétiques d'action permet leur regroupement en une *Loi globale du déterminisme de la nature* postulée.

Conclusions sur la causalité et conséquences pour le déterminisme

Une cause suffisante naturelle donnée produit toujours un effet instantanément et tant qu'elle existe (sans interruption). Cet effet est toujours le même, partout : c'est pourquoi on peut postuler qu'il est régi par une loi, donc postuler aussi le déterminisme.

Mais pour que ce déterminisme puisse :

- *régir* la transformation de toutes les situations ;
- permettre d'en *comprendre* l'existence grâce à un historique complet ;
- permettre d'en *prévoir* l'évolution et d'en *prédire* le résultat lorsque c'est possible (et au niveau de détail possible),

nous avons enrichi le Déterminisme statistique, avec les lois descriptives et les lois d'interruption, dans le Déterminisme général, qui comprend aussi :

- Une théorie des fluctuations quantiques (exemple : force de Casimir-Lifshitz) ;
- Des indéterminations dues au Principe d'incertitude de Heisenberg ;
- Des principes limitatifs comme celui de Pauli ;
- Des lois de conservation et symétries (invariances) ;
- Des lois de stabilité et de décomposition aux niveaux moléculaire, atomique ou nucléaire ;
- Des lois de fusion et de synthèse ;
- Des lois d'hystérésis ;
- Des lois de transition de phase ;
- Des lois de représentation, manipulation et stockage de l'information ; (horizon étiré des trous noirs, principe holographique, etc.) ;
- Une loi de conservation de l'information d'un système fermé.

  On peut donc représenter les niveaux de déterminisme sur le diagramme du paragraphe suivant.

5.10 Les niveaux de déterminisme (diagramme)

Déterminisme cognitif humain
* *Héritage génétique*
* *Héritage culturel et connaissances acquises*
* *Contexte de l'instant*

Déterminisme général
* *Lois d'interruption*
  - Principes d'incertitude de Heisenberg, principe d'exclusion de Pauli, Invariance CPT…
  - Principes de conservation et de symétrie
  - Lois de stabilité et de décomposition
  - Lois de fusion et de synthèse
  - Lois de transition d'état
  - Lois d'hystérésis
  - etc.
* *Lois d'évolution*
* *Lois de représentation, manipulation et stockage de l'information*

Déterminisme statistique
* *Mécanique, Electrodynamique et Chromodynamique quantiques*
* *Systèmes dynamiques (chaos)*

Déterminisme restreint de la physique classique
* *Lois de Newton*
* *Equations de Maxwell*
* *Relativité restreinte et générale*
* *Thermodynamique*

Niveaux de déterminisme régissant la connaissance scientifique

5.11 Conclusion sur le Déterminisme général

Le Déterminisme général, postulé par notre doctrine, est capable de régir toutes les lois d'évolution conservatives et toutes les lois de transition d'état de la nature. La raison en est la constatation que la nature fait la synthèse instantanée des lois d'évolution et de transition d'état nécessaires, en toutes circonstances ; dans le Déterminisme général cette synthèse est effectuée par la Loi globale d'interruption, avec sa puissance algorithmique capable de tous les raisonnements logiques de la pensée humaine, et sa fonction de veille qui détecte tous les changements instantanément.

6 Hasard

En interrogeant mes amis, je n'ai trouvé personne qui nie l'existence et l'influence du hasard ; ce sont même des lieux communs : « le hasard existe, admettre son effet est le bon sens même ». Nous allons voir pourquoi tous se trompent.

6.1 « Au hasard » par opposition à « déterministe »

Nous avons défini le hasard plus haut comme : « Est au hasard une situation ou une évolution qui n'a ni cause ni loi. » Développons cette description.

Ce que tout le monde sait sur le hasard

La notion de hasard s'oppose à celle de déterminisme en niant ou en restreignant les possibilités de comprendre, prévoir et prédire. Selon le *Dictionnaire de l'Académie* [3], une situation ou une évolution est dite « au hasard » lorsqu'elle est :

- Sans but précis (finalité au hasard) ;
- N'importe comment (caractéristiques au hasard) ;
- Sans ordre, ni méthode (structure ou déroulement au hasard) ne permettant pas de calculer une valeur d'une suite connaissant des valeurs précédentes ;
- Selon ce qui se présente accidentellement par l'effet de l'imprévu (sans cause).

Ce qu'on croit à tort

L'adjectif *au hasard* est souvent employé pour qualifier quelque chose qui n'a pas de cause connue et dont on ne sait pas prévoir l'évolution. Ainsi, par exemple :

- Un phénomène naturel au hasard surviendrait sans que s'applique aucune loi de causalité de la nature, qui aurait alors « fait n'importe quoi sans raison ».

  Exemple : la décomposition radioactive ci-dessus paraît choisir ses atomes au hasard à qui n'en connaît pas l'explication physique ; ce phénomène décrit par la Mécanique quantique relève du *Déterminisme statistique*.

  Le déroulement d'une décomposition due à une instabilité des noyaux atomiques n'est pas *causal*, au niveau d'un atome, mais *collectif* au niveau d'une population ; il suit la loi de la demi-vie, il n'est donc pas au hasard.

- La plupart des mesures physiques sont entachées d'erreurs qui en limitent la précision ; un résultat de mesure semble alors aléatoire, défini par exemple par une loi de probabilités comme celle de Gauss, rencontrée si souvent qu'on l'a aussi qualifiée de « Loi normale ».

  Exemple : distribution des tailles (en centimètres) des hommes adultes dans un pays (probabilité qu'un homme adulte donné ait une certaine taille).
  Mais là non plus il n'y a pas de hasard, voyons à présent pourquoi.

  Comme toute affirmation scientifique, une éventuelle absence de règle ou d'explication doit être démontrable. Leur ignorance ne justifie pas qu'on attribue la création d'un phénomène ou sa distribution de valeurs au hasard. Donc :

  « Comme il est impossible de démontrer le hasard d'un phénomène inexpliqué en montrant que l'existence d'une explication contredirait une certitude établie, on doit assumer l'ignorance, non invoquer le hasard. »

Nous compléterons ces idées ci-dessous.

Valeur « au hasard » d'une variable - Définitions

Une variable est au hasard quand sa valeur ne dépend d'aucune autre valeur ou loi statistique. Cette variable n'est alors connue, en plus de son type (numérique, binaire…) que par un domaine d'existence comme un intervalle ou un ensemble de valeurs discrètes.

Stochastique (adjectif)
Stochastique signifie « qui relève d'une probabilité », comme le résultat d'un lancer de dé. Une variable est stochastique lorsque ses valeurs sont distribuées selon une loi de probabilité comme la Loi normale, la Loi de Poisson, la Loi Binomiale, la Loi Uniforme (dont les valeurs sont équiprobables, comme celles d'un lancer de dé), etc.

Différence entre stochastique et déterministe
Dans les mêmes circonstances initiales :

- Un processus stochastique produit des valeurs distribuées selon sa loi de probabilité ;
- Un processus déterministe reproduit une même valeur, à l'échelle macroscopique, ou un même ensemble de valeurs distribuées selon sa loi de probabilité, à l'échelle atomique (raison : règle de stabilité).

Hasard ou imprédictibilité ?
Le hasard a 3 définitions scientifiques que nous préciserons plus loin, mais qu'on peut résumer comme suit : est au hasard toute structure, tout comportement dont on peut *démontrer* l'impossibilité d'une description complète à partir d'une de ses parties et/ou du contexte, faute de lois de déduction ou de calcul applicables.

Si elle existait, une évolution naturelle au hasard serait une caractéristique objective (indépendante de l'homme), et dont l'absence de loi descriptive est démontrée.

Remarque : hasard ou pas, la nature ne peut violer ses lois générales, par exemple de conservation de l'énergie, de la charge électrique, du moment cinétique, de la quantité d'information en Mécanique quantique, etc. Ces lois sont définies par l'homme précisément pour régir tous les cas de leur domaine de définition, sans exception.

Pour ceux qui croient au hasard, une évolution au hasard serait imprévisible et son résultat serait imprédictible. Pour ceux qui savent qu'il n'y a pas de hasard en physique (voir le paragraphe suivant), l'impossibilité de prévoir, et a fortiori de prédire, relève d'une absence de connaissance.

6.2 La notion de hasard n'existe pas en physique

Citations de célébrités

Disons-le tout net, comme Kant dans [20] page 286 :
« Tout ce qui arrive est hypothétiquement nécessaire [=nécessaire par hypothèse] : c'est là un principe fondamental qui soumet dans le monde le changement à une loi, c'est-à-dire à une règle s'appliquant à l'existence nécessaire, sans laquelle règle il n'y aurait pas même de nature. Par conséquent, le principe : rien n'arrive par un hasard aveugle *(en latin : in mundo non datur casus)* est une loi *a priori* de la nature. »

> **« Rien n'arrive par un hasard aveugle est une loi a priori de la nature. »**
> (C'est l'homme qui définit les lois de la nature, et il les définit sans exception.)

Ou comme René Thom, mathématicien, médaille Fields 1958, dans [63] :
« Affirmer que le hasard existe, c'est donc prendre cette position ontologique qui consiste à affirmer qu'il y a des phénomènes naturels que nous ne pourrons jamais décrire, donc jamais comprendre. »
Et c'est contraire au Principe d'intelligibilité.

Ou plus brièvement, comme Henri Poincaré dans [65] :
« Le hasard n'est que la mesure de notre ignorance. »

Ou enfin de façon imagée, comme Einstein au congrès Solvay de 1927 :
« Gott würfelt nicht » (Dieu ne joue pas aux dés : la nature ne fait pas n'importe quoi). Einstein disait cela pour s'opposer à l'interprétation probabiliste de Copenhague de la Mécanique quantique.

Expliquons ces opinions.

6.3 Le besoin de rigueur dans l'invocation du hasard

Quand les gens attribuent-ils quelque chose au hasard ?

Quand une personne affirme que quelque chose est dû au hasard, c'est peut-être parce qu'elle n'en connaît pas la cause, donc ne sait pas à quelles circonstances et quelle loi de la nature cette chose est due ; c'est peut-être aussi parce qu'elle pense que personne ne sait. C'est là du « *hasard par ignorance* », une confusion entre imprédictibilité et hasard.

Cas particulier d'ignorance : il arrive que l'imprédictibilité ou l'insuffisance de précision soient dues à la complexité, au nombre de variables du problème. C'est le cas, par exemple, dans le diagnostic d'un psychiatre, dans la prévision d'un cours de bourse par un investisseur ou dans la prédiction d'une évolution du chômage par un chef d'état.

L'attribution d'une cause au hasard exige une démonstration

Affirmer qu'une situation, l'état d'un système ou une évolution, sont dus au hasard demande autant de rigueur qu'affirmer qu'ils sont régis par une loi de la physique.

A celui qui me dit : « c'est dû au hasard », je réponds : « prouvez-le ! ».

L'affirmation « C'est dû au hasard » doit être prouvée par celui qui la formule, avec la même rigueur que la proposition « C'est dû à la loi X ». Or, à part les lois résultant d'une déduction purement logique (qui ne nous apprennent rien, car leur contenu résulte entièrement de leurs prémisses) *une loi de la nature ne se démontre pas*, elle est postulée par induction à partir de phénomènes constatés et de leur évolution, et on l'admet à titre provisoire jusqu'à ce qu'un contre-exemple la fasse déclarer fausse : *une loi affirmée après examen contradictoire par des gens compétents est donc toujours supposée vraie jusqu'à preuve du contraire* (voir *Rationalisme critique de Karl Popper*).

Aucune constatation d'un ensemble de phénomènes ne prouve qu'ils sont dus au hasard

On ne peut pas démontrer *qu'il n'existe pas* de loi d'évolution d'une situation donnée, c'est-à-dire que d'une fois sur l'autre elle peut ne pas évoluer ou évoluer différemment ; on ne peut prouver qu'une loi *ne pourra pas être trouvée* ou qu'il existera des situations ou une loi *sera nécessairement instable*, donc ne sera pas une loi d'évolution.

En mathématiques on peut prouver qu'une valeur de variable n'existe pas, mais pas que deux variables de même type sont indépendantes. Lorsque John Bell a démontré que dans un problème de Mécanique quantique « il n'existe pas de variable cachée » c'était à l'aide de corrélations, pas de façon logique.

Quelles que soient les constatations faites sur un phénomène et leur nombre, quel que soit l'étonnement qu'elles nous suggèrent, il est impossible d'en déduire une preuve d'absence de loi naturelle qui le régit ; et le fait de ne pas avoir découvert de loi ne prouve pas qu'il n'y en a aucune.

Lorsqu'on ne connaît pas de loi d'évolution d'une situation donnée on peut toujours affirmer cette ignorance, on ne peut jamais affirmer le caractère nécessaire du hasard, avec son absence de loi.

« Le hasard est toujours invoqué au lieu de l'ignorance. »

6.4 Le déterminisme ne garantit pas la prédictibilité

En abandonnant le Déterminisme philosophique au profit du Déterminisme restreint, puis du Déterminisme statistique et enfin du Déterminisme général, nous avons abandonné la promesse de prédictibilité des résultats d'évolution ; nous avons simplement conservé la conséquence nécessaire d'une cause suffisante : le déclenchement immédiat et inévitable d'une transformation.

On peut s'étonner que les promesses du déterminisme (comprendre, prévoir et prédire) aient distingué prévoir et prédire : pouvoir prévoir n'est-ce pas pouvoir prédire ?

Eh bien, non ! Il existe des phénomènes naturels dont les lois d'évolution sont connues, mais dont l'application ne permet pas de formuler toutes les prédictions souhaitables ; voyons cela.

Cas dans lesquels une évolution a un résultat imprédictible

L'imprédictibilité d'une situation ou d'un résultat d'évolution peut avoir des causes diverses, mais ne constitue pas une preuve de hasard. Voici des cas d'imprédictibilité du résultat d'une évolution.

Nature stochastique de la loi d'évolution de l'objet – Prédictibilité statistique

- Exemple 1

  Une loi physique d'évolution déterministe de l'échelle atomique, l'équation de Schrödinger, fait qu'à un instant donné la position et la vitesse d'une particule en mouvement dans un champ électromagnétique ont des valeurs mesurables possibles régies par une loi statistique ; ces valeurs sont déterministes et leurs ensembles sont connus avant la mesure ; voir Evolution vers un ensemble d'états superposés.

  Mais, à la fin de l'évolution, une valeur effectivement mesurée est choisie, parmi les éléments de son ensemble, par une opération brutale de décohérence qui n'est pas régie par l'équation de Schrödinger et n'est même pas déterministe, parce qu'il est impossible de la décrire et de l'exécuter de manière reproductible.

- Exemple 2

  Un *système dynamique* (système dont l'évolution est décrite par une suite d'itérations d'une fonction d'évolution déterministe), tend fréquemment vers un état chaotique : il est calculable à chaque itération, mais imprédictible à long terme connaissant seulement son état initial. Il peut seulement être décrit à l'avance, sous certaines conditions, par des statistiques comme un histogramme des états finaux.

Ces deux exemples relèvent du Déterminisme statistique. Il nous suffit, pour le moment, de donner la définition suivante.

Prédictibilité statistique d'une évolution
Par définition, une évolution a une *prédictibilité statistique* si ses résultats sont stochastiques (c'est-à-dire distribués selon une loi statistique) ; une expérience renouvelée plusieurs fois peut alors donner des résultats différents. Sa loi naturelle d'évolution est gouvernée par un Déterminisme statistique où c'est *l'ensemble des résultats possibles qui est prédéterminé par les conditions de l'expérience et la loi d'évolution, non un résultat particulier.*

Lors d'une telle évolution, la nature refuse le résultat unique que l'homme désire ; c'est l'ensemble auquel ce résultat appartient qui est unique et prédéterminé, chaque expérience ayant un résultat appartenant à cet ensemble.

En outre, lors d'expériences renouvelées ou de changement de valeur initiale avant itération, les résultats sont distribués selon une loi stochastique de probabilités, elle-même prédéterminée. On ne doit pas parler, alors, de résultat *au hasard,* car il ne peut être quelconque, totalement imprévisible ; on parle de *Déterminisme statistique* car seul *le choix de résultat* dans l'ensemble prédéterminé est imprévisible ; et il l'est parce que ce choix n'est régi par aucune loi : la décohérence est brutale, le choix d'une position dans le voisinage d'un point est arbitraire, etc.

La complexité : évolution régie par une ou plusieurs lois déterministes
L'effet global d'un grand nombre de phénomènes déterministes, simultanés ou non, peut être imprévisible, même si chacun est simple et à résultat prévisible.

Exemple : mouvement brownien
Considérons une petite enceinte fermée qui contient un nombre immense de molécules identiques de liquide ou de gaz. Le seul fait que ces molécules aient une température supérieure au zéro absolu (-273.15°C) fait qu'elles s'agitent sans cesse, l'énergie cinétique associée à leur vitesse caractérisant la température. Cette agitation, le *mouvement brownien*, les fait rebondir les unes sur les autres et sur les parois, conformément à des lois des chocs élastiques parfaitement connues et déterministes, donc sans intervention du hasard. Mais il est impossible de connaître la position et la vitesse à l'instant *t* d'une molécule particulière, car :

- Elle a subi trop de rebonds contre d'autres molécules en mouvement et contre les parois de l'enceinte pour que les calculs soient à la portée d'un ordinateur, même puissant ;
- A l'échelle atomique, chaque rebond de molécule est affecté par sa forme irrégulière, la rugosité locale de la paroi, et l'imprécision sur la position, la direction et la vitesse d'un choc due à la largeur du paquet d'ondes de probabilité accompagnant chaque molécule. La loi des chocs élastiques est donc difficile à

appliquer avec précision, les conditions initiales de chaque choc étant entachées d'erreurs non négligeables.

Cette impossibilité de connaître le mouvement précis d'une molécule particulière est très générale : la combinaison d'un grand nombre de phénomènes déterministes à évolution individuelle prévisible produit une évolution imprévisible, que ces phénomènes soient ou non du même type. Par *combinaison* il faut entendre ici :

- Soit une succession de phénomènes de même type comme les chocs élastiques d'une molécule particulière ;
- Soit la simultanéité de phénomènes déterministes différents qui agissent indépendamment ou interagissent pour produire un effet global ;
- Soit l'instabilité d'un phénomène qui change de loi d'évolution selon un paramètre critique soumis à un autre phénomène changeant, par exemple lors d'une bifurcation.

En résumé, *la complexité d'un phénomène à composantes déterministes produit en général une évolution imprévisible*, et encore plus imprévisible si on prend en compte les imprécisions et indéterminations dues à la Mécanique quantique.

Il faut pourtant se garder d'attribuer au hasard une évolution qui n'est imprévisible que parce que la complexité du phénomène d'origine rend trop difficile la prévision de son résultat par calcul ou raisonnement. Le caractère aléatoire d'une évolution à l'échelle atomique (évolution décrite par la Mécanique quantique) caractérise un choix d'élément de l'ensemble (déterministe) des résultats que sont les valeurs propres possibles d'une équation, alors que le hasard caractérise l'inexistence d'un algorithme à résultats utilisables.

L'imprévisibilité par excès de complexité, qui n'existe pas en théorie dans la nature (ses transformations déterministes étant arrêtées ou déclenchées par des lois d'interruption), sévit hélas en pratique. Elle n'affecte pas la nature, qui jamais n'hésite ou ne prévoit l'avenir (ce n'est pas un être pensant), mais elle empêche l'homme de prédire ce qu'elle va faire. Et cette imprévisibilité est d'autant plus grande que le nombre de phénomènes successifs ou simultanés est grand, que leur diversité est grande, que leurs interactions sont nombreuses, et que l'imprécision quantique intervient davantage.

Les interactions entre phénomènes ont un effet sur leur déterminisme lui-même. Une évolution dont le résultat impacte les conditions initiales d'une autre évolution joue sur la reproductibilité de cette dernière, ce qui handicape encore plus la prédiction de son résultat.

C'est pourquoi les phénomènes les plus complexes (ceux des êtres vivants, du psychisme de l'homme et de son comportement) ont beau n'être, au niveau biologie moléculaire, que des évolutions physiques déterministes, leurs résultats sont en général si imprévisibles que l'homme a l'impression que la nature fait n'importe quoi.

Calculs trop complexes
Un système soumis à des lois déterministes connues peut avoir une évolution précise exigeant des calculs trop complexes ou trop prolongés pour être réalisables.

Exemples :

- Prévoir quelle boule va « sortir » d'une sphère de tirage de loto connaissant les paramètres initiaux ;

- Prévoir le temps qu'il fera à Lyon dans 30 jours.

Solution : une description approximative
La complexité des phénomènes naturels incite souvent l'homme à les décrire au moyen de théories générales, permettant une *connaissance en grandes lignes* avec des règles de possibilité et d'impossibilité, mais ne permettant pas la prédiction d'évolutions.

Exemple : la théorie de Darwin sur l'évolution des espèces par sélection naturelle prévoit la survie de celles dont les individus sont les mieux adaptés à leur environnement et les plus prolifiques. Mais elle ne permet pas de prédire l'évolution d'une espèce donnée ; on ne connait pas, par exemple, les caractéristiques de l'espèce qui succèdera à *Homo sapiens*.

L'ignorance
En plus de tout ce que nous ignorons en physique, il y a de nombreux systèmes dans la société humaine dont l'évolution est difficile à prévoir, ou à prédire avec la précision désirée, parce qu'on ne peut pas connaître toutes les valeurs des paramètres nécessaires. Exemples :

- Des cours de bourse soumis à des anticipations d'investisseurs, optimistes ou non, influencés par des médias ou non ;
- Ce qui se passe dans le subconscient, qu'on ne peut décrire avec assez de précision pour que les affects et les raisonnements soient prévisibles.

  Certains hommes ont tendance à attribuer au hasard ce qu'ils ne peuvent expliquer ou prévoir. D'autres l'attribuent à Dieu : c'est le cas, par exemple, de la loi américaine qui admet comme cause d'une catastrophe naturelle « An act of God ».

En plus de l'ignorance de valeurs de paramètres, il y a leur imprécision expérimentale : un résultat peut sembler « entaché de hasard » alors qu'il souffre d'imprécision matérielle ou opératoire.

> *Affect*
> Aspect subjectif conscient d'une émotion que l'on ne peut décrire à partir d'autres concepts, car c'est un concept de base.

L'imprécision
Il y a des cas où la précision du résultat (calculé ou mesuré) de l'application d'une loi d'évolution peut être jugée insuffisante.

- Imprécision des paramètres et hypothèses simplificatrices d'une loi d'évolution. La formulation mathématique d'une loi d'évolution a des paramètres. Si ceux-ci sont connus avec une précision insuffisante, le résultat calculé sera lui-même entaché d'imprécision. C'est le cas notamment lorsqu'une loi d'évolution fait des hypothèses simplificatrices.

  Exemple : la dynamique (=mouvement) d'un pendule simple est décrite par une équation différentielle non linéaire. Pour simplifier la résolution de cette équation, on recourt à « l'approximation des petites oscillations », qui assimile un sinus à son angle en radians. Cette simplification entraîne des erreurs de prédiction du mouvement qui croissent avec l'amplitude des oscillations.

- Imprécision ou non-convergence des calculs dans un délai acceptable
Si le calcul d'une formule ou d'une solution d'équation est insuffisamment précis, le résultat peut être lui-même imprécis. Il arrive aussi que l'algorithme du modèle mathématique du phénomène ne puisse fournir son résultat, par exemple parce qu'il converge trop lentement. Il peut enfin arriver que le modèle mathématique d'un processus déterministe ait un cas où le calcul de certaines évolutions est impossible, par exemple pour une propagation d'onde [B67].

- Changement de loi d'évolution suite à une transition de phase
Une évolution peut être soumise à des lois successives, par exemple lors d'un changement de phase. Le Déterminisme général prend en compte ce problème avec ses lois d'interruption.

- Voir aussi la sensibilité aux conditions initiales.

L'instabilité
Les fluctuations quantiques d'énergie sont dues à une instabilité intrinsèque, une *impossibilité* de définir une énergie à un instant donné à un endroit donné, car elle varie constamment et sans cause ; cette impossibilité est quantifiée par le Principe d'incertitude de Heisenberg, théorème démontré en Mécanique quantique.

La sensibilité aux conditions initiales
Il y a des lois d'évolution déterministe chaotique où une prédiction précise du changement exige une impossible connaissance de ses paramètres avec une précision infinie. Exemple : trajectoire d'un astéroïde du système solaire, soumise aux perturbations gravitationnelles de l'énorme Jupiter et des autres planètes ; Henri Poincaré a démontré l'impossibilité en étudiant le *Problème des trois corps*.
Nous avons évoqué ce sujet ce sujet au paragraphe *Déterminisme des processus itératifs*.

L'exigence d'un raisonnement algorithmique
Lire d'abord en annexe *Complétude d'une axiomatique*.

Les réponses à certaines questions légitimes exigent un raisonnement logique à étapes multiples, processus procédural ; ces réponses ne peuvent résulter d'une simple synthèse d'informations. Un tel raisonnement est décrit par un algorithme, suite d'étapes de calcul parcourues en tenant compte de valeurs de données au moyen de choix du type :

> « Si la condition *C* est remplie aller à l'étape suivante, sinon aller à l'étape *n* ».

Le résultat d'un tel parcours, donc du raisonnement, dépend des valeurs de départ et de valeurs calculées précédemment par l'algorithme : il est donc imprévisible au vu des seules données de départ.

Exemple d'algorithme : (source [67])
Le modèle économique appelé "Mésange" (graphique ci-dessous), prend en compte de nombreux mécanismes qui interagissent pour décrire ce qui se passe dans l'économie française lorsqu'on baisse les coûts salariaux, par exemple lors d'une baisse des charges des entreprises. De taille moyenne pour un modèle économique, Mésange comprend environ 500 équations.

Lorsqu'un résultat nécessite un tel algorithme, il faut souvent plusieurs années de travail à des spécialistes pour en écrire le programme. Parfois, des dizaines

d'exécutions de ce programme avec des jeux de paramètres différents révèlent des lois économiques simples à expliquer au public, parfois l'économie reste un mystère…

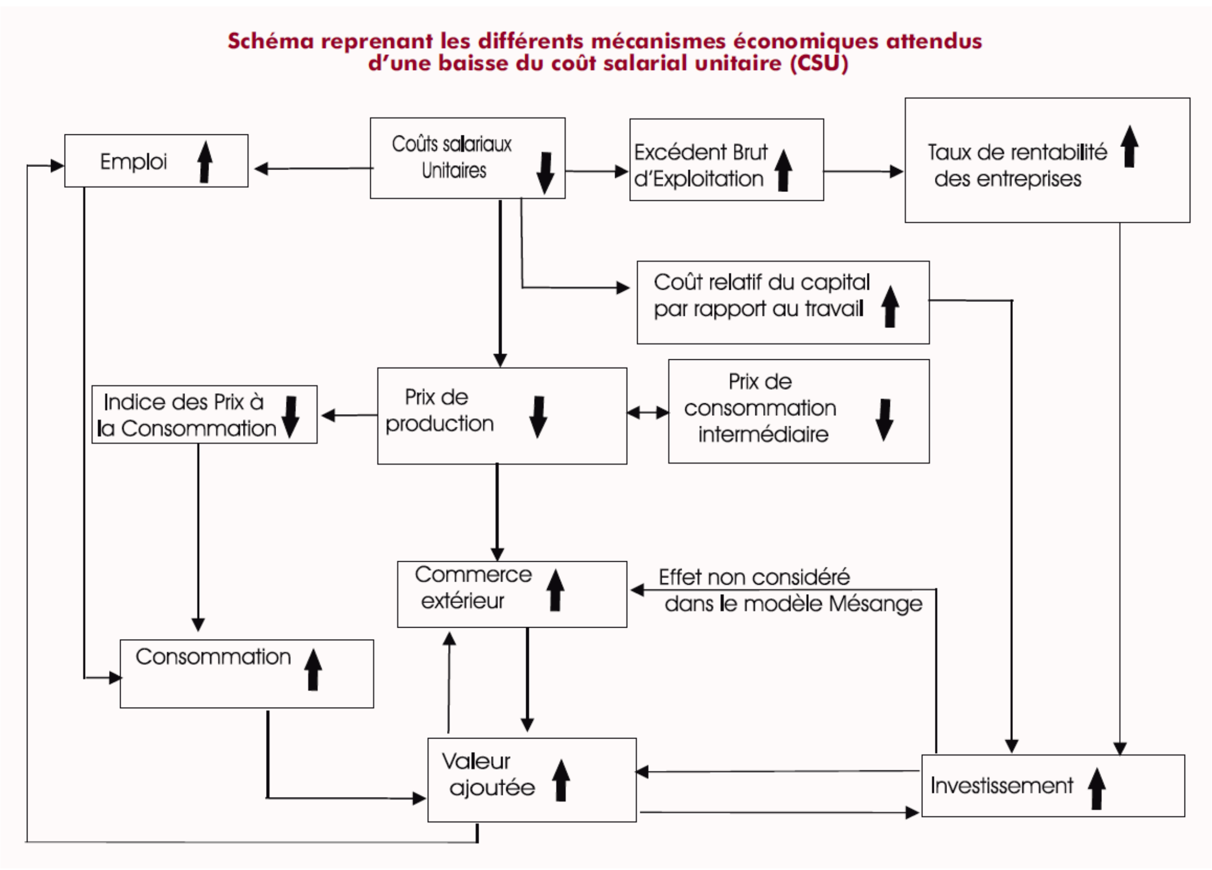


Schéma du modèle Mésange

Exigences de prédictibilité que la nature ne peut satisfaire

a) L'absence de réponse

La curiosité fait souvent poser à l'homme des questions auxquelles la nature n'a pas de réponse. Nous avons vu plus haut l'exemple de la décomposition radioactive, où on ne peut savoir quel atome se décomposera le premier et quand. Nous avons aussi vu le caractère probabiliste des positions et vitesses de particules. Il y a également le phénomène de décohérence de la physique quantique, où l'interaction d'une superposition d'états quantiques avec l'environnement macroscopique choisit une des solutions superposées de manière imprévisible. Il y a enfin le phénomène des fluctuations quantiques d'énergie, les trajectoires chaotiques des astéroïdes, etc.

b) La précision insuffisante

Il y a des cas où la loi d'évolution que la nature applique ne peut fournir la précision que nous voudrions. La loi de décomposition radioactive ne s'applique pas à un atome, mais à une population où chaque atome a une certaine probabilité de se décomposer en un intervalle de temps donné : on ne peut lui faire dire quelque chose pour *un* atome.

> **« Il y a des évolutions régies par une loi d'ensemble ne permettant pas de connaître des événements particuliers ou de savoir ce que devient un des éléments de l'ensemble. »**

c) La Relativité
Il y a aussi les lois de l'espace-temps de la Relativité, où l'ordre de survenance de deux événements *A* et *B* peut être différent pour deux observateurs différents : impossible de faire dire à la nature quel événement est *absolument* le premier, parce qu'il n'y a pas, dans l'Univers, de temps absolu (contrairement à ce que postulait Newton dans son célèbre ouvrage *Principia* [9]).

> **« Dans l'espace-temps relativiste il n'y a pas de temps absolu : la date-heure d'un événement dépend de la position relative de l'observateur et de son mouvement. »**
>
> **« Il n'y a pas, non plus, d'ordre absolu de deux événements : cet ordre dépend de la position de l'observateur et de son mouvement. »**

d) L'intrication de particules
Il y a aussi *l'intrication*, où deux photons générés ensemble et partageant une même énergie - pourtant distants de plusieurs kilomètres - cèdent cette énergie et disparaissent ensemble si on capture un seul d'entre eux. Cela se produit malgré la limitation de vitesse d'une propagation de conséquence à celle de la lumière, car les deux photons formant un même objet la disparition de l'un est en même temps disparition de l'autre [96]. Un éventuel désir de connaître l'existence de l'un des deux sans impacter l'autre ne peut être satisfait.

> **« Dans certaines expériences, un système de particules intriquées peut grandir indéfiniment, sans cesser de se comporter comme s'il est tout entier au même point de l'espace : on dit que dans ce cas "l'espace n'est pas séparable". »**

e) Il y a encore le Principe d'incertitude de Heisenberg, la sensibilité aux conditions initiales, etc.

Toutes ces impossibilités d'obtenir le résultat que nous voulons, ces limitations de la connaissance à ce que la nature veut bien nous dire, ne mettent pas en cause le déterminisme : chaque cause a bien sa (ou ses) loi(s)-conséquence(s), que la nature applique toujours et sans délai, mais c'est à l'homme d'accepter de la connaître sous les formes qu'elle a, pas sous celles qu'il voudrait qu'elle ait.

Ainsi, comme nous ne pourrons jamais voir une particule de l'échelle atomique, nous devons nous contenter de la connaître par l'intermédiaire d'équations qui en décrivent l'évolution, notamment de l'équation fondamentale de la Mécanique quantique, dite « de Schrödinger », qui en décrit l'évolution dans le temps et l'espace. Nous devons renoncer à savoir, à un instant donné, la position et la vitesse de la particule, dont nous n'aurons jamais que des probabilités ou des densités de probabilité, c'est-à-dire une vision floue.

Conclusions sur les résultats d'évolution imprévisibles
Nous devons alors comprendre qu'une particule peut se trouver à une infinité d'endroits à la fois, un petit volume autour d'un endroit donné ayant alors une certaine probabilité de présence. A une position donnée, une particule peut avoir une infinité de vitesses, chacune aussi probabiliste. Une particule peut aussi parcourir une infinité

de trajectoires à la fois. Toutes ces réalités ne font intervenir aucun hasard, mais des distributions de probabilités qui limitent les valeurs possibles.

Le psychisme humain
Le cerveau humain a des processus logiques prévisibles (exemple : les déductions rationnelles) et des processus imprévisibles (exemples : les pensées subconscientes, les intuitions, les associations d'idées). Les neurones de la pensée sont des objets matériels, donc toujours soumis à des lois naturelles lorsqu'ils s'excitent et agissent par interconnexion. Mais leurs processus subconscients (qui ont un rôle prépondérant) sont inaccessibles au sujet, qui ne peut donc les comprendre et encore moins en décrire les lois, malgré les progrès des connaissances actuelles.

L'imprédictibilité de la pensée humaine n’est donc pas due aux processus neuronaux, mais à l'impossibilité d'en connaître suffisamment le fonctionnement subconscient, qui interprète en permanence les informations du cerveau (voir *Les pensées ne sont que des interprétations de l'état du cerveau par lui-même*).

6.5 Les trois définitions du hasard

Il y a trois définitions scientifiques du hasard, hélas toutes négatives car de la forme « Est au hasard un phénomène qui n'est pas… ».

1. Définition de René Thom

Le mathématicien René Thom, médaille Fields 1958, a défini le hasard dans [63] comme suit :

> "Je voudrais dire d'emblée que cette fascination de l'aléatoire [croire que le hasard existe dans la nature] témoigne d'une attitude antiscientifique par excellence. De plus, dans une large mesure, elle procède d'un certain confusionnisme mental, excusable chez les auteurs à formation littéraire, mais difficilement pardonnable chez des savants en principe rompus aux rigueurs de la rationalité scientifique.
>
> Qu'est-ce en effet que l'aléatoire ? On ne peut en donner une définition que purement négative : est aléatoire un processus qui ne peut être simulé par aucun mécanisme, ni décrit par aucun formalisme. Affirmer que « le hasard existe », c'est donc prendre cette position ontologique [et dogmatique] qui consiste à affirmer qu'il y a des phénomènes naturels que nous ne pourrons jamais décrire, donc jamais comprendre. […]
>
> Le monde est-il astreint à un déterminisme rigoureux, ou y a-t-il un « hasard » irréductible à toute description ? Ainsi posé, évidemment, le problème est de nature métaphysique et seule une option également métaphysique est en mesure de le trancher. En tant que philosophe, le savant peut laisser la question ouverte ; mais en tant que savant, c'est pour lui une obligation de principe - sous peine de contradiction interne - d'adopter une position optimiste et de postuler que rien, dans la nature, n'est inconnaissable a priori [c'est-à-dire le Principe d'intelligibilité]."

René Thom décrit donc l'effet du hasard comme une impossibilité de description en un langage de programmation, due à une impossibilité de comprendre et prévoir. Cette description correspond bien à la raison le plus souvent responsable de l'affirmation « C'est dû au hasard » : l'ignorance non assumée.

Conjecture : l'irrégularité n'est pas un critère suffisant de hasard
René Thom qualifie d'aléatoire tout processus (phénomène observé, suite des décimales d'un nombre, suite d'éléments…) non modélisable par un algorithme. Selon cette définition, la suite des décimales de nombres irrationnels comme $\sqrt{2}$ ou π (que l'on sait générer par algorithme) n'est pas aléatoire, bien qu'elle n'ait aucune régularité connue (si on appelle régulière une suite de décimales dont on peut calculer par récurrence toute décimale de rang *n* connaissant un ensemble de décimales de rangs inférieurs à *n*).

Si on postule cette irrégularité des décimales de $\sqrt{2}$ et π, l'irrégularité de René Thom n'est pas un critère suffisant de hasard, puisqu'on sait générer par algorithme des suites irrégulières de chiffres ; mais c'est là une conjecture, pas une certitude établie.

Cas de la machine à boules de tirage du loto
Nous considérons comme aléatoires (soumis à un hasard imprévisible) les tirages du jeu de loto générés par une machine qui agite des boules dans une sphère tournante. René Thom la considèrerait-il comme un mécanisme, donc ses tirages comme non aléatoires ? Leur caractère "aléatoire" vient de la complexité de ses processus, où chaque boule subit de nombreux chocs, trop nombreux pour que l'on puisse prédire si elle sortira ou non ; ce caractère aléatoire résulte donc de *l'imprévisibilité par complexité*, critère que nous avons abordé précédemment ; ce n'est pas un hasard *démontré*.

2. Définition par action de chaînes de causalité indépendantes - Hasard par ignorance

Deux chaînes de causalité (déterministes par définition) issues d'origines indépendantes peuvent se rencontrer, créant alors une situation nouvelle qui n'était prévisible dans le déroulement d'aucune des deux chaînes prises séparément.

Exemple : un jour de tempête, une tuile tombe d'un toit au moment précis où un homme passait par là, et elle le blesse. Si on considère la chaîne de causalité tempête-tuile indépendante de celle de l'homme qui marche (hypothèse évidente, car bien que toutes deux soient issues du même phénomène initial du Big Bang, nous savons que l'évolution de l'Univers est imprévisible), leur rencontre est imprévisible. Voir aussi *Remarque sur l'unicité de l'évolution de l'Univers.*

Une personne qui n'avait pas prévu cette rencontre peut l'attribuer à tort au hasard. Mais une définition plus complète des circonstances, prenant en compte l'ensemble des deux phénomènes, élimine le hasard : à l'origine, toutes les conditions étaient réunies pour que plus tard la tuile blesse l'homme. L'étonnement ou la rareté d'un phénomène ne justifient pas qu'on attribue au hasard le résultat global de processus qui respectent les lois déterministes de la nature.

Les seuls domaines naturels où on trouve une évolution produisant un semblant de hasard sont la Mécanique quantique et les phénomènes chaotiques ; tous deux sont déterministes et relèvent de la prédictibilité stochastique du Déterminisme statistique.

L'exemple de la tuile ci-dessus montre qu'une prévision basée sur le déterminisme doit prendre en compte *tous* les paramètres susceptibles d'intervenir dans l'évolution à prévoir, ce qui est souvent impossible. Refuser sciemment de prendre en compte la situation d'ensemble, c'est accepter l'ignorance et le risque de prédictions fausses.

L'indépendance des chaînes de causalité doit être démontrée, comme l'attribution au hasard. Mais allons plus loin.

La Relativité restreinte montre qu'un événement *A* ne peut être cause d'un événement *B* si l'information "*A* a eu lieu", voyageant à la vitesse de la lumière, arrive à la position de *B après* la survenance de *B*. Mais même si cette information arrive à la position de *B avant l'événement B* on peut seulement affirmer que *A peut être* la cause de *B*, pas que *A est* la cause de *B*.

Il y a ensuite la condition d'application du déterminisme : l'évolution doit être régie par une loi stable. Cette condition peut être remplie par tout phénomène naturel conservatif, mais pas par un phénomène où intervient l'action d'un être vivant qui pense, homme ou animal, comme dans le Déterminisme cognitif humain.

3. Définition du hasard par la quantité d'information

On peut aussi définir comme aléatoire *un nombre dont l'écriture est plus concise (en nombre de signes ou de bits, par exemple) que le texte de tout algorithme capable de le générer* ; un tel nombre a donc une écriture incompressible par algorithme. En admettant qu'il est absurde d'écrire en un langage informatique un algorithme plus long que le nombre que son exécution générerait, il n'existe pas d'algorithme intéressant capable de générer un nombre aléatoire, ce qui justifie la définition de René Thom.

Le problème de cette définition est d'ordre pratique : étant donné un nombre et un algorithme qui le génère, comment être certain que cet algorithme est le plus concis ? C'est impossible ! La définition ci-dessus n'a donc qu'un intérêt théorique.

Conclusion sur ces trois définitions du hasard

> **« Le hasard qui régit une structure ou une évolution ne peut être défini que de manière négative, en disant ce qu'elle n'est pas. »**
> (Le caractère imprévisible qu'implique le hasard ne peut être défini que par une impossibilité de déduction ou de génération algorithmique. Comprendre le hasard ainsi défini demande de l'intuition.)

Conséquence

> **« Il n'y a pas de hasard en physique, tout ce qui arrive devait arriver. »**

Conclusion de ce qui précède : attribuer ce qu'on n'explique pas, situation ou phénomène, au hasard est toujours une erreur, une manière de ne pas admettre son ignorance.

Principe de fatalisme

Confirmant nos affirmations que les attributions au hasard sont dues à l'ignorance, voici la position de Kant à la page 286 de la *Critique* [20] :

"Tout ce qui arrive est hypothétiquement nécessaire [postulé nécessaire] : c'est là un principe fondamental qui soumet dans le monde le changement à une loi, c'est-à-dire à une règle s'appliquant à l'existence nécessaire…"

Kant pense donc que les évolutions naturelles suivent un *Principe de fatalisme* :
(1) « Tout ce qui arrive *devait* arriver, car toute évolution a une cause et une seule. »

(2) « Ce qui n'est pas arrivé ne pouvait pas arriver. »

Démonstration : la régression des causes
En vertu du *Principe de raison suffisante (en abrégé : principe de raison)*, toute situation constatée résulte d'une cause (situation entraînant une évolution) qui a elle-même certainement existé et qui, à son tour, résultait d'une cause, etc. jusqu'au commencement du monde : on parle de *chaîne de causalité* de la situation constatée. Puisque tous les éléments de cette chaîne ont nécessairement existé, chacun comme conséquence du précédent et le premier comme conséquence du Big Bang, on peut parcourir en pensée toute la chaîne de causalité dans son sens normal des causes aux conséquences (du passé vers le présent) pour aboutir à la situation constatée ; celle-ci devait donc nécessairement survenir. Et toutes les évolutions ont été soumises à des *lois de la nature*, elles-mêmes soumises à la *Règle de stabilité*.

Critique de cette démonstration et limitation de sa portée
Cette démonstration suppose une limitation des phénomènes au monde macroscopique, car le parcours de la chaîne de causalité du passé vers le futur est supposé unique, ce qui exclut les résultats multiples d'évolution du Déterminisme statistique. Pour tenir compte de cette possibilité de résultats multiples, on devrait remplacer la loi (1) ci-dessus par :

« Tout ce qui arrive *pouvait* arriver, car toute évolution a une cause. »

Le principe de fatalisme perdrait alors tout intérêt, car ce serait un truisme.

Par contre, ce qui n'est pas arrivé n'a pas de chaîne de causalité remontant au Big Bang et ne pouvait donc pas arriver.

Remarque sur les choix imprévisibles de la nature ou de l'homme
A la fin d'une évolution déterministe régie par l'équation (continue et déterministe) de Schrödinger, le système peut être dans un état particulier appelé « superposition d'états ». Abandonné à lui-même, sans action extérieure, il subira (en général au bout d'un temps très court) une interaction avec son environnement, par exemple un échange de température ou l'intervention d'un dispositif de mesure.

De telles interactions « choisissent » un état final visible et stable à l'échelle macroscopique parmi les états superposés, et suppriment les autres états. Elles sont impossibles à décrire avec précision, donc à prédire : elles ne sont pas déterministes. Donc si, à la fin de l'évolution déterministe du système, on considère le choix final comme faisant partie de ce système et de l'expérience, on ne peut plus s'attendre à ce que l'évolution soit déterministe puisqu'elle est perturbée d'une manière impossible à préciser. *L'évolution déterministe prend donc fin avant le choix final qui en détermine le résultat*.

Plus généralement, on ne doit pas chercher le caractère déterministe d'un phénomène impossible à décrire avec précision comme une pensée humaine, dans laquelle interviennent des processus cognitifs subconscients. Comme nul ne connaît ces processus, on ne peut chercher à en prévoir le déroulement et à en prédire le résultat ; on ne peut donc parler de déterminisme à leur sujet, bien que les processus cognitifs soient tous des interprétations par le cerveau de l'état de ses neurones (voir *Conscience de*), donc des phénomènes matériels déterministes : Kant avait déjà remarqué ce paradoxe.

L'évolution de l'Univers depuis le Big Bang n'est pas prévisible

Toute loi d'évolution a un résultat déterministe, sauf lorsque son application se termine par un choix d'un des types suivants :

1. Choix d'une valeur de variable continue (position, etc.) affectée d'une densité de probabilité. Ce choix est imprévisible s'il est effectué dans des circonstances non déterministes, comme la sensibilité aux conditions initiales qui amplifie les écarts.
2. Choix d'un des états d'une superposition quantique par décohérence.
   On peut considérer que le résultat de ce choix est sans conséquence pour l'évolution ultérieure, les états superposés étant équivalents en énergie : l'évolution ultérieure est donc prévisible dans ce cas.
3. Choix d'une des branches d'une bifurcation. On peut considérer que la branche choisie dépend d'un état de système englobant qui est déterministe, donc que ce choix est aussi prévisible.
4. Choix résultant d'un cas de déterminisme non causal, comme la date imprévisible de la décomposition radioactive d'un certain noyau atomique.

Comme à l'échelle atomique (à laquelle se ramènent les lois d'évolution macroscopique) il n'y a pas de frottement, le résultat de toute évolution commencée est, en dernière analyse, prévisible au sens du Déterminisme statistique.

« A l'échelle atomique il n'y a pas de frottements »

Mais contrairement au cas des univers de Laplace et de Newton, cela ne suffit pas pour que toute évolution y ait été (et soit encore) prévisible : dans le cas 1 ci-dessus on peut seulement prédire une valeur avec un intervalle de probabilité. Parfois la différence possible est insignifiante à l'échelle macroscopique, mais parfois elle est amplifiée comme lors d'une sensibilité aux conditions initiales.

En outre, *le début* d'une évolution peut résulter d'un autre choix, lui nécessairement non déterministe : un choix fait par un être vivant. Les choix humains, par exemple, sont imprévisibles car soumis à son subconscient, et ces choix comptent : penser aux bombes atomiques de 1945, par exemple. Le raisonnement dépasse alors la dispute entre matérialistes et idéalistes concernant l'intervention ou non d'une transcendance dans les choix humains : même les matérialistes ont une pensée dont la plupart des raisonnements ont une part d'imprévisibilité subconsciente ! Mais l'imprévisibilité des décisions humaines s'explique par ce subconscient sans intervention transcendante. Et la Terre fourmille d'êtres vivants jouissant d'une liberté de ce genre.

Conclusion :

« En toute rigueur, l'évolution de l'Univers est imprévisible. »

7 Déterminisme humain : cerveau et conscience

Hypothèse fondamentale

> **« Une décision humaine n'est motivée que par la valeur dominante du moment. La raison et la logique ne sont que des outils au service de cette valeur, elles ne fournissent que des méthodes et critères de jugement. »**

Une pensée rationnelle existe bien, mais l'effort qu'elle demande n'est entrepris que dans l'espoir d'une récompense satisfaisant une valeur a priori.

> Exemple : je n'entreprends de chercher la démonstration (rationnelle) d'un nouveau théorème mathématique que si j'espère me valoriser en la publiant.

Nous savons aujourd'hui que c'est ainsi que fonctionne le cerveau humain.

En outre, une pensée n'est rationnelle que si chacune de ses étapes respecte la logique, sans biais émotionnel, même si elle n'est justifiée que par un affect.

Tout le texte de ce livre sur le déterminisme présuppose ces conditions d'un raisonnement rationnel.

Postulat du Déterminisme humain

La doctrine déterministe de la pensée rationnelle représente le cerveau comme un ensemble de processus interpréteurs de son état du moment, état constitué de représentations et d'affects actifs et sensibles. Matérialiste, elle nie toute intervention transcendante et toute transmission de pensée.

Cette doctrine recommande une *méthode scientifique*, comprenant l'adoption d'un critère de vérité par consensus appliqué à des affirmations falsifiables.

Le reste de ce chapitre et les trois chapitres suivants sont consacrés au Déterminisme humain.

7.1 La conscience et le cerveau interpréteur

Voici une description succincte de la nature et du fonctionnement de la *conscience d'un objet* et de la *conscience de soi* : pour une personne, qu'est-ce que « avoir conscience de » ? Comment son esprit interprète-t-il perceptions des sens et abstractions diverses sous forme d'impressions de conscience ? Qu'est-ce que la conscience en tant qu'ensemble de phénomènes psychiques ?

Sources : [51], [52], [42], [44]

7.2 La conscience en tant qu'ensemble de processus interpréteurs

Le texte suivant résume le fonctionnement de la faculté psychique de conscience. Voici des définitions dont nous aurons besoin.

Représentation

Le mot *représentation* a deux significations :

- Acte par lequel l'esprit du sujet se représente une chose (son objet, par exemple un phénomène) tel qu'elle est à un instant donné. C'est une mise en relation de l'objet avec l'ensemble de données mentales qui le représentent dans l'esprit du sujet. L'objet peut être externe à l'esprit (phénomène) ou interne (concept pur).

L'objet qu'un sujet se représente est *présent à son esprit* en mémoire de travail. Sa représentation a fait l'objet d'une intuition, puis d'un entendement, et souvent d'une réflexion visant une compréhension plus profonde. Le sujet est conscient de cette présence à l'esprit.

- Résultat de cet acte : l'ensemble de données mentales précédent, en mémoire de travail, dont l'esprit peut prendre conscience par intuition, entendement et raison.

Conceptualisation

Une représentation n'est consciente que sous forme d'un concept, dont le processus général de formation s'appelle *conceptualisation*.

Présence à l'esprit – Prise de conscience

Un phénomène ou un objet est dit *présent à l'esprit* (qui l'a pris en compte en en *prenant conscience*) lorsque sa représentation est en mémoire de travail et qu'elle a commencé à être appréhendée par l'entendement (c'est-à-dire la compréhension), ou qu'elle est associée à un concept issu de l'intuition, de l'entendement, de la raison ou de l'imagination.

La prise de conscience d'une représentation se fait par conceptualisation.

Psychisme

Le substantif psychisme désigne l'ensemble, conscient ou inconscient, considéré dans sa totalité ou partiellement, des phénomènes et processus relevant de l'esprit, de l'intelligence et de l'affectivité, et constituant la vie psychique. Cet ensemble comprend les phénomènes conscients, relevant de l'état d'éveil, et les phénomènes subconscients, présents que le sujet soit éveillé ou non.

Processus

Un processus est une action d'un mécanisme mental d'un sujet ; c'est un enchaînement d'opérations exécutant des fonctions psychiques :

- Elaboration de concepts (conceptualisation) ;
- Fonctions cognitives (ensemble des facultés mentales d'acquisition, de gestion et d'utilisation des connaissances, notamment les fonctions entendement et mémoire. Elle traduit des représentations d'objets réels en symboles conceptuels et raisonne sur ces symboles) ;
- Jugements d'une affirmation (jugements vrai/faux et jugements de valeur) ;
- Raisonnements (déduire une affirmation d'autres, tenues pour vraies ; chercher un enchaînement de concepts produisant un résultat désiré…) ;
- Organisation par l'entendement et la raison de connaissances présentes à l'esprit :
  - classification (appartenance à un ensemble) ;
  - récognition de concept ou de procédure (reconnaître en identifiant) ;
  - sériation (trier des éléments ou les mettre en relation avec d'autres) ;
- Etc.

Parallélisme de processus

Le psychisme exécute spontanément un grand nombre de processus en parallèle (se déroulant simultanément). Ainsi, après prise de conscience d'une représentation :

- L'esprit en tire automatiquement des conséquences simples comme l'évaluation « Est-ce bon ou mauvais pour moi ? ». Cette évaluation a une *grandeur* « bon ou très bon ? » / « mauvais ou très mauvais ? »
  - Pour chaque résultat d'évaluation il existe un seuil de conscience, en dessous duquel l'évaluation est ignorée.
  - Les évaluations « très » peuvent déclencher des processus prioritaires interrompant des processus en cours.
- L'esprit cherche spontanément s'il y a dans sa mémoire des souvenirs qui ont quelque chose en commun avec la représentation actuelle. Chaque souvenir ainsi trouvé est apprécié aussitôt au sens « bon ou mauvais ».

Tous ces processus sont lancés spontanément et simultanément sans que le sujet en ait conscience, et ils se déroulent en parallèle.

7.3 Un vieux débat : la conscience est-elle transcendante ?

La présentation du livre récent sur la conscience [44] commence par :
« Ce livre renouvelle le débat séculaire sur la possibilité de réduire la conscience à un *processus* neuronal." Directeur de recherches au CNRS, l'auteur sait de quoi il parle. Voilà des siècles que des philosophes se demandent si l'esprit humain, avec sa conscience du monde et sa conscience de soi, est une conséquence du seul fonctionnement physique du cerveau. La conscience ne résulte-t-elle pas aussi (comme le croyait Descartes) de quelque chose d'immatériel, comme Dieu ? Puisque lors d'un rêve notre pensée vagabonde sans cause consciente, et puisqu'elle crée souvent des idées spontanément, comment ne pas supposer qu'elle a des facultés transcendantes ? »

Le problème de la nature de la conscience humaine a une dimension métaphysique : est-elle d'origine exclusivement matérielle, intérieure à notre corps, ou a-t-elle en plus des causes non matérielles (transcendantes) comme l'influence divine ?

Descartes, se méfiant des interprétations de son esprit : « Je suis une chose qui pense »

Au XVIIe siècle, Descartes savait comme Platon que l'homme n'est pas conscient de la réalité, mais seulement des idées de son esprit, idées qui comprennent des représentations mentales des perceptions de ses sens. Croyant qu'il pouvait se tromper, et désirant malgré cela trouver la vérité sur la nature de son être fait d'un corps et d'un esprit, il commençait par mettre ses interprétations en doute dans [17] :

« Je suppose donc que toutes les choses que je vois sont fausses ; je me persuade que rien n'a jamais été de tout ce que ma mémoire remplie de mensonges me représente ; je pense n'avoir aucun sens ; je crois que le corps, la figure, l'étendue, le mouvement et le lieu ne sont que des fictions de mon esprit. Qu'est-ce donc qui pourra être estimé véritable ? » ([17] *Méditation seconde*)

Ces hypothèses relèvent du scepticisme.

Bien que doutant de tout, Descartes était certain d'exister au moins en tant que "chose qui doute" :

« De sorte qu'après y avoir bien pensé, et avoir soigneusement examiné toutes choses, enfin il faut conclure, et tenir pour constant que cette proposition : Je suis, j'existe, est nécessairement vraie, toutes les fois que je la prononce, ou que je la conçois en mon esprit. » ([17] *Méditation seconde*)

Descartes finit par conclure qu'en plus d'avoir un corps matériel, "substance corporelle, étendue", il avait aussi un esprit (une âme) "substance pensante, intelligente" :

« Mais qu'est-ce donc que je suis ? Une chose qui pense. Qu'est-ce qu'une chose qui pense ? C'est-à-dire une chose qui doute, qui conçoit, qui affirme, qui nie, qui veut, qui ne veut pas, qui imagine aussi, et qui sent. » ([17] *Méditation seconde*)

Dans les deux passages précédents, le "je" de "je suis" désigne à l'évidence l'objet de la conscience de soi, expression que Descartes n'utilise pas. Mais hélas, en se contentant de qualifier sa conscience de *substance pensante*, Descartes ne l'explique pas ; et en attribuant toutes choses à Dieu, il en admet sans preuve la transcendance.

Un professeur : « Aucune cause physique n'explique les abstractions humaines »

En 2009, le livre d'un professeur de philosophie enseigne que « La nature abstraite de la pensée humaine l'empêche de résulter d'un phénomène exclusivement physique : aucun phénomène matériel ne crée d'abstraction ; quel que soit leur fonctionnement, les neurones ne suffisent pas pour expliquer la conscience humaine, il faut en plus quelque chose de transcendant. »

Nous allons voir pourquoi cette opinion si répandue est fausse :

> **« Le phénomène matériel qui crée des abstractions est le cerveau interpréteur humain. »**

7.4 Conscience de…

On parle de *conscience de*… pour désigner les mécanismes psychiques par lesquels l'homme prend connaissance d'un objet présent à son esprit. On en parle avec les verbes avoir et être :

- Quand j'ai conscience d'un objet, il est présent à mon esprit, je peux en parler.
- Quand je suis conscient d'une situation, elle est présente à mon esprit.

La *conscience de* est un état instantané du psychisme

C'est une « photo » du contenu de l'esprit. Cet état change automatiquement au fur et à mesure que l'objet de conscience change : lorsque je suis conscient qu'un ballon vient vers moi, son image dans mon esprit (c'est-à-dire sa photo) change (ou est remplacée) au fur et à mesure de son déplacement.

L'état où l'esprit a conscience de quelque chose n'arrive pas passivement, il résulte d'une attention qui est *intentionnelle*, que cette attention ait été déclenchée volontairement (par un raisonnement) ou par un réflexe.

La *conscience de* résulte d'un ensemble de données (informations)

Dans mon esprit, l'état d'un objet à un instant donné (l'ensemble des informations à son sujet dont je suis conscient) figure sous forme d'un ensemble de données appelé *représentation* de l'objet dont je suis conscient. Cet ensemble d'informations en représente à la fois *les caractéristiques* et *la signification psychologique* qu'il a pour moi, propriétés que je peux décrire et dont je peux parler car j'en suis conscient.

Signification psychologique
Sentiment qu'inspire une pensée ou une perception. Exemples :

- Pour un optimiste, la vie a un sens et mérite des efforts ; pour un nihiliste elle n'en a pas, et il peut se laisser aller à l'abattement comme à la révolte violente.
- Le nihilisme est une doctrine de désespoir pour qui aucune valeur n'a de réalité. Le nihiliste nie les valeurs morales, religieuses et sociales, car elles n'ont pas, à ses yeux, de *sens psychique*. Pour lui, aucun espoir n'est permis, aucun effort n'est justifié, aucune autorité n'est supportée.

  Le sentiment ci-dessus est toujours fortement dépendant des conséquences imaginées à la suite de la perception ou de la pensée : le rôle de cette imagination (spontanée ou délibérée) est très important.

Cet ensemble d'informations dont j'ai conscience est la seule origine possible de mon appréhension de l'objet, puisque mon cerveau ne peut manipuler que les abstractions qu'il s'est construit ou possède depuis sa naissance.

> **« Mon cerveau ne peut manipuler que les représentations qu'il s'est construit ou possède depuis sa naissance ».**

L'état psychique *conscience de* se confond donc avec cette représentation : lorsque je me souviens d'avoir eu *conscience de* quelque chose, ce sont *des données* que j'ai présentes à l'esprit.

Justification : une *conscience de* est nécessairement un ensemble de données

1ère raison
L'état d'un système est décrit par un ensemble de variables ayant une valeur à un instant donné. Si le système évolue dans le temps (en se déplaçant, en se transformant…) son état change, et certaines des variables qui le décrivent changent de valeur.

Or la *conscience de* est un état psychique à un instant donné, résultat pour un individu de l'état de certains de ses neurones et des excitations (signaux électrochimiques transportant des informations) qu'ils ont échangées. A un instant donné, la *conscience de* est donc décrite par un ensemble de données, celui de l'état des neurones correspondants et des excitations émises et reçues jusqu'à cet instant-là.

Il y a donc un « code conscient », propre à chaque individu, qui décrit la représentation dont il a conscience à un instant donné. Selon [42] page 205 :

« La distribution des cellules actives et inactives compose un code interne qui reflète fidèlement le contenu de la perception subjective. Ce code conscient est stable et reproductible : ce sont toujours les mêmes neurones qui déchargent dès que le patient pense à Bill Clinton. Il suffit, pour les activer, d'imaginer le visage du président : la plupart des neurones du cortex temporal antérieur répondent avec la même sélectivité

aux images réelles et aux images mentales. Une représentation extraite de la mémoire suffit également à les réactiver. »

2ème raison
Lorsque je suis conscient de quelque chose (et seulement si j'en suis conscient, ce qui implique que j'y fais attention), je peux en parler. Or les muscles qui agissent pour parler (ceux de la bouche, etc.) sont commandés par des neurones moteurs. Comme tous les neurones, ceux-ci sont activés par des signaux d'excitation et seulement de cette manière-là ; ils sont donc activés par des données, celles des signaux reçus, elles-mêmes provenant d'autres neurones, etc., l'origine de la chaîne de neurones étant la conscience de.

Pour activer une chaîne de neurones se terminant par les neurones moteurs de la parole, la conscience de ne peut donc être qu'un ensemble de données. Si l'origine des signaux activant la parole était une fonction autonome et inconsciente du psychisme, elle ne pourrait pas émettre des signaux aboutissant à des paroles cohérentes, fonction du seul contenu de la conscience de.

La conscience d'une représentation est celle de son concept, et seulement celle-là

L'ensemble de données décrivant un objet, qu'il soit concret (phénomène) ou abstrait, présent à l'esprit ou en mémoire de long terme, est sa représentation. Dire que l'esprit est conscient d'un concept, c'est dire que la représentation dont il est conscient est interprétée par lui sous forme de ce concept, que c'est ainsi qu'il la comprend. Représentation et concept correspondent au même état des mêmes neurones ; les notions de *représentation* et de *concept* sont deux manières complémentaires de décrire cet état, comme en physique la matière et l'énergie.

Toute prise de conscience est accompagnée d'un affect

Chaque arrivée d'une représentation en mémoire de travail provoque sa conceptualisation par l'entendement : elle devient présente à l'esprit sous forme de concept. Ce concept est accompagné d'une évaluation spontanée qui le juge « favorable » ou « défavorable », « prometteur » ou « inquiétant ». En fonction de cette évaluation et de son intensité, la raison intervient éventuellement pour approfondir le concept et ses conséquences, et chaque étape de cet approfondissement est accompagnée d'un jugement de valeur spontané.

7.5 Conscience (tout court)

La *conscience* (tout court) est l'ensemble des *processus* psychiques permettant la connaissance du monde et de soi-même à l'état d'éveil : attention, *conscience des* autres et de soi, représentations et affects. Les fonctions psychiques manipulent des données abstraites (les représentations) pour les mémoriser, raisonner sur elles et commander des actions musculaires. Du point de vue physiologique les fonctions résultent d'états et d'excitations de neurones.

On se représente parfois cette forme de *conscience* sous forme d'*appareil virtuel* regroupant des fonctions psychiques ; on dit par exemple : « les fonctions nécessaires à l'entendement sont *dans la conscience* ». On parle aussi d'*appareil inconscient* pour le dispositif virtuel où se produisent les phénomènes psychiques inaccessibles à la *conscience* ; on dit par exemple : « la faculté de reconnaissance des visages fait partie de l'inconscient ».

La conscience en tant que processus interpréteur

Kant pensait que la conscience fonctionne comme un interpréteur dont le logiciel est le même pour les représentations d'objets des sens que pour celles d'abstractions, donc indépendant de cas particuliers de phénomène ou de raisonnement. Le cerveau interprète l'état de ses neurones et le déroulement des signaux qu'ils échangent. Nous avons aujourd'hui la même interprétation du fonctionnement de la conscience.

Conscience des actes et des procédures

L'esprit de l'homme a conscience de ses actes, de ses pensées et de ses représentations, conscience évoquée à propos de la conscience de soi. Il se souvient de ses gestes et des procédures (suites de gestes ou d'opérations mentales) utilisés pour résoudre un problème particulier.

> « Je me souviens du chemin pour aller à gare et de la méthode d'addition de deux nombres. »

L'homme qui a conscience de ses actes et de ses pensées s'en souvient et peut les reproduire. Il peut y réfléchir et en induire des méthodes valables pour tous les cas semblables ; exemples : la méthode pour additionner deux fractions, la méthode de dérivation d'une fonction trigonométrique. Enfin, il peut reconnaître dans une suite d'actions ou de pensées un cas particulier d'une procédure plus générale : si on me présente un raisonnement en trois étapes, je sais reconnaître s'il s'agit d'un syllogisme.

7.6 Interprétation - Processus de la conscience

Source : [43]

Les pensées ne sont que des interprétations de l'état du cerveau par lui-même

Notre psychisme est incapable de manipuler des objets physiques. Il ne manipule que des abstractions qui les représentent appelées concepts, et ceux-ci n'ont que deux origines possibles : celles dont nous avons hérité de nos ancêtres en naissant, par notre génome [57], et celles que nous nous sommes construites depuis - notamment en nous représentant mentalement le monde que nous percevons.

Dans mon esprit, c'est une abstraction appelée *représentation* qui tient lieu d'objet, réel ou abstrait. Mon esprit ne peut pas voir ma maison physique, il "voit" son image abstraite (un phénomène dont est issue une représentation) et il la considère comme réelle. Et c'est sur le concept associé à cette représentation, sur ce qu'il en voit comme sur ce qu'il en imagine, qu'il raisonne si nécessaire ; c'est son seul accès à la réalité, c'est ce qui en tient lieu pour l'esprit. L'esprit *interprète* ses représentations
Voir *Principe de la primauté de la connaissance sur les objets (doctrine)*.

Cette constatation réfute l'argument philosophique « *Aucune cause physique n'explique les abstractions humaines* » : c'est bien une telle cause, le fonctionnement de notre cerveau, qui explique toute notre pensée, avec sa conscience et ses abstractions ; nous l'avons vérifié à l'aide d'enregistrements de l'activité cérébrale.

Notre système nerveux transmet les perceptions de nos sens à notre cerveau, qui les interprète. La représentation en mémoire de travail d'une image perçue est interprétée en tant qu'image, parce que nous avons appris depuis la naissance à l'interpréter comme cela. Les lettres et mots d'un texte sont interprétés comme tels parce que nous avons appris à lire. Une sensation de brûlure est interprétée comme de la chaleur et

une douleur à l'endroit correspondant du corps. Une suite de représentations correspondant à un ballon qui arrive vers moi est interprétée correctement, etc.

En outre, tous les événements perçus par nos sens externes et interne sont appréciés comme « Bons » ou « Mauvais » au fur et à mesure de leur interprétation, appréciation complétée par une prédiction « Prometteur » ou « Inquiétant ».

Le cerveau peut aussi créer des idées à partir de représentations et d'autres idées ; il n'a besoin d'aucune transcendance pour cela. Enfin, aucune expérience possible ne peut prouver une action transcendante, pas plus sur un cerveau que sur quoi que ce soit d'autre dans l'Univers ; nous allons développer cela.

7.7 Modèle informatique du psychisme

Nous pouvons concevoir aujourd'hui les facultés de bas niveau du psychisme comme un ensemble de processeurs (ordinateurs) interconnectés fonctionnant en parallèle :

- Un processeur des informations provenant des sens, qui les met en mémoire de travail et les traduit en jugements qualitatifs de bas niveau : favorable/défavorable, prometteur/menaçant, etc. Ce processeur produit des perceptions.
- Un processeur d'intuition et d'entendement, qui interprète les perceptions et les suites de perceptions pour fournir des concepts de l'entendement, premier niveau de la compréhension. Ces concepts sont immédiatement et automatiquement jugés au sens favorable/défavorable.
- Un processeur de raisonnement, qui assemble rationnellement des concepts de l'entendement et de la raison, eux aussi appréciés au fur et à mesure de leur génération.
- Un processeur de la mémoire, au service des autres, avec des facultés de recherche, synthèse, analogie, conscience de soi, mémorisation des étapes de travail du processeur de raisonnement, etc. Ce processeur transfère sans cesse des représentations entre la mémoire de travail (à court terme) et la mémoire de long terme.
- Un processeur des affects, jugeant tout ce qui passe par la mémoire de travail et contrôlant le fonctionnement des autres processeurs, dont il lance et interrompt des traitements. C'est le "système d'exploitation" du psychisme, le siège des jugements de valeur, de la conscience et des émotions. Comme les autres, le processeur de raisonnement est à son service : ce n'est jamais la raison qui régit les choix d'une personne, contrairement à ce que pensait Descartes.

« Nos choix ne sont pas régis par la raison, mais par nos affects. »

Tous ces processeurs fonctionnent comme des ordinateurs indépendants, partageant la même mémoire et se sous-traitant des raisonnements partiels sur des données fournies à chaque appel.

7.8 La rationalité scientifique refuse toute référence à Dieu

Le problème de la nature de la faculté humaine de conscience a une dimension philosophique : est-elle rationnelle, c'est-à-dire d'origine exclusivement matérielle et intérieure à notre Univers, ou a-t-elle en plus des causes non matérielles (transcendantes) comme l'influence divine ?

La réponse rationnelle, adoptée par tous les scientifiques, suppose la compréhension du monde et de ses lois physiques à partir de faits réels, ainsi que de théories dont nul ne peut prouver la fausseté (on ne peut jamais prouver la *vérité*, notion impossible à définir en toute rigueur, mais on peut prouver l'erreur d'un raisonnement ou la non-conformité d'une affirmation avec une expérience particulière).

Une définition ou une théorie scientifique excluent l'influence et la volonté divines

Qu'il soit ou non croyant, un scientifique ne peut invoquer l'influence de Dieu, de l'Esprit ou de l'Idée pour expliquer un phénomène matériel qu'il étudie : il doit se comporter en matérialiste. S'il admettait la possibilité d'une origine ou d'une influence transcendante dans notre Univers, il renoncerait à en comprendre rationnellement certaines situations ou phénomènes à partir de faits vérifiables ou de théories falsifiables, donc à en prévoir l'évolution. Ayant besoin de comprendre les situations et de prévoir leur évolution, l'homme ne peut donc renoncer à postuler la rationalité du matérialisme, doctrine qu'aucune déduction logique ou causale n'impose. C'est pourquoi un scientifique cohérent peut aussi adopter la doctrine réaliste ou l'idéalisme transcendantal de Kant, tout aussi rigoureux en matière de raisonnement scientifique que le matérialisme.

Falsifiable

Une affirmation, une hypothèse ou une théorie est dite falsifiable si on peut imaginer (ou mieux, créer expérimentalement) une situation où elle est prise en défaut, même si on ne peut pas imaginer de situation où elle se réalise - notamment parce qu'elle est indécidable ou spéculative. Exemples :

- La loi d'Ohm « L'intensité de courant électrique à travers une résistance est proportionnelle à la différence de potentiel entre ses bornes » est falsifiable ;
- L'affirmation « Ce feu de forêt a pour origine la volonté de Dieu » est infalsifiable.

Infalsifiable

Adjectif qui qualifie une affirmation dont on ne peut prouver la fausseté éventuelle ; c'est le contraire de *falsifiable*. Une hypothèse (ou une conjecture, ou une théorie) est dite falsifiable si on peut imaginer (ou mieux, créer expérimentalement) une situation où elle est prise en défaut, même si on ne peut pas imaginer de situation où elle se réalise - notamment parce qu'elle est indécidable ou spéculative. Exemples :

- La loi d'Ohm « L'intensité de courant électrique à travers une résistance est proportionnelle à la différence de potentiel entre ses bornes » est falsifiable ;
- L'affirmation « Ce feu de forêt a pour origine la volonté de Dieu » est infalsifiable.

Notre approche, dans ce texte, sera donc matérialiste. Nous postulerons que :

- La pensée est une conséquence du fonctionnement physique du seul cerveau, même si nous ne comprenons pas tous les détails de ce fonctionnement.
- Aucune influence sur la pensée (transcendante, spirituelle ou autre) ne s'exerce ou ne s'est exercée. La pensée et sa conscience supposent un cerveau vivant, et réciproquement un cerveau pense continuellement du seul fait qu'il vit, à l'état d'éveil ou de sommeil.

  « La conscience s'explique sans invoquer de transcendance. »

7.9 Une pensée non rationnelle (esthétique, morale…) a toute sa place

Il ne faudrait pas déduire de ce qui précède que seule la pensée rationnelle est valable. J'aime la musique de Mozart sans savoir pourquoi ; comme toute impression esthétique, apprécier un morceau de musique ou une peinture se produit sans réflexion, spontanément et sans délai. Je ne vois d'ailleurs pas pourquoi il faudrait toujours comprendre *pourquoi* on éprouve ceci ou cela : souvent l'émotion suffit.

8 Le jugement humain

8.1 Vérité

Vérité d'une connaissance d'objet

(Source : [20] page 148)

Si on définit la vérité d'une connaissance comme *l'accord de celle-ci avec son objet*, il n'existe pas de critère *universel* de vérité, valable quel que soit l'objet de la connaissance. En effet, un tel critère devrait permettre de distinguer avec certitude entre les significations d'un objet et de la connaissance qu'on en a, ce qui est absurde par définition même du contenu d'une connaissance, qui est sa signification !

Vérité d'une proposition

Mais qu'en est-il de la vérité d'une proposition ? Un texte que je lis dit-il la vérité sur son objet ? Pour en juger, je devrais connaître avec certitude la signification de l'objet ; mais si c'était le cas, pourquoi me donner la peine de lire le texte ? Pour vérifier si son auteur dit la vérité sur l'objet, c'est-à-dire comprend la même chose que moi ? Mais si, ne connaissant pas la vérité sur l'objet, je lis le texte pour l'apprendre de son auteur, je n'ai aucun moyen de savoir s'il dit vrai ; je peux tout au plus chercher dans le texte des contradictions avec des certitudes que j'ai par ailleurs, ou des erreurs *formelles*, problème abordé au paragraphe suivant. Arrêtons ici cette discussion, car elle sort du cadre de ce texte.

Vérité formelle (qui a trait à la forme, indépendamment du sens)

(Source : [20] pages 148-149)

Puisque la logique définit des règles *universelles* de l'entendement et de la raison, une proposition doit nécessairement les respecter toutes sous peine d'être fausse (de se contredire elle-même dans au moins un cas).

Mais un tel respect est *formel* : le fait qu'une proposition ne se contredise pas (=qu'elle soit formellement correcte) ne garantit pas qu'elle soit vraie, elle peut parfois contredire son objet. La logique pure n'a pas les moyens de découvrir, dans une proposition, une éventuelle erreur sur le contenu, mais seulement une erreur formelle.

Par définition, vérité *formelle* est synonyme de vérité *logique*.

La vérité formelle d'un texte est l'absence de contradiction interne
(Citation de [37] pages 56 à 58)
« La vérité *formelle* consiste simplement dans l'accord de la connaissance avec elle-même, en faisant complètement abstraction de tous les objets et de toute différence entre eux. Et par conséquent les critères formels universels de la vérité ne sont rien d'autre que les caractères logiques universels de l'accord de la connaissance avec elle-même, ou ce qui est la même chose - avec les lois universelles de l'entendement et de la raison.

Ces critères formels universels ne sont assurément pas suffisants pour la vérité objective, mais ils doivent cependant être considérés comme sa condition *sine qua non* [la satisfaction de tous ces critères est une condition nécessaire d'existence]. Car avant de se demander si la connaissance s'accorde avec l'objet, il faut d'abord se demander si la connaissance s'accorde avec elle-même (selon la forme). Et telle est l'affaire de la logique. »

Les critères formels de la vérité en logique sont :

- Le Principe de contradiction, qui détermine la possibilité logique d'une connaissance ; et le Principe de déterminabilité d'un concept, conséquence du principe de contradiction ;
- Le Principe de raison suffisante, qui détermine la réalité logique d'une connaissance.

Principe de raison suffisante (aussi appelé Principe de raison)

> **« Tout ce qui existe (objet) et tout ce qui se produit (événement) a nécessairement une cause due à une loi de la nature. »**

(Citation de [20] page 266)
« Le principe de raison suffisante [du déterminisme] est le fondement de toute expérience possible, c'est-à-dire de la connaissance objective des phénomènes relativement à la façon dont ils se rapportent les uns aux autres dans la succession du temps. »
(Fin de citation)
Pour une étude complète voir [39].

8.2 Vérité logique d'une connaissance

Elle requiert :

- D'être *logiquement possible*, c'est-à-dire qu'elle ne se contredise pas. Mais cette marque de la vérité logique interne est seulement négative car une connaissance qui se contredit est assurément fausse, et une connaissance qui ne se contredit pas n'est pas toujours vraie.
- D'être *logiquement fondée*, c'est-à-dire :
  - Qu'elle respecte des principes :
    - ✓ Conformité au Postulat de causalité (causalité factuelle),
    - ✓ Ou être une déduction logique d'une proposition certaine (causalité logique).

    (Voir Les deux sortes de déductions causales) ;
  - Qu'elle n'ait pas de conséquence fausse.

    C'est là un critère de vérité logique externe et de rationalité.

Les deux règles suivantes s'appliquent : la règle 1 ci-dessous, la règle 2 au paragraphe Vérité scientifique.

Règle 1

De *la vérité de la conséquence* on peut conclure à *la vérité de la connaissance P* prise pour principe, mais de façon négative seulement : si une conséquence fausse résulte d'une connaissance *P*, alors cette connaissance *P* elle-même est fausse. Car si le principe est vrai, la conséquence devrait également être vraie, puisque la conséquence est déterminée par le principe.

Mais on ne peut pas conclure à l'inverse : « si aucune conséquence fausse ne découle d'une connaissance *P*, cette dernière est vraie » ; car d'un principe faux on peut conclure des conséquences vraies.

Raisonnement apagogique (c'est-à-dire par l'absurde)
Ce mode de raisonnement, selon lequel la conséquence peut seulement être un critère négativement et indirectement suffisant de la vérité de la connaissance, est appelé en logique le mode apagogique (en latin : modus tollens).

Apagogie – Apagogique

- Apagogie : raisonnement par lequel on démontre la vérité d'une proposition en prouvant l'impossibilité ou l'absurdité de la proposition contraire.
- Apagogique : par l'absurde.

Conséquence importante
Règle : il suffit de tirer *une seule conséquence fausse* d'une connaissance pour faire la preuve de sa fausseté, alors que mille conséquences vraies n'en prouvent pas la vérité dans tous les cas. C'est sur ce critère-là qu'est basée la vérité scientifique admise de nos jours.

8.3 Vérité scientifique

Origine du critère moderne de vérité scientifique

(Source : [20] page 650)

Kant remarque fort justement qu'il est plus facile et plus rigoureux de chercher si une proposition ou une thèse est *fausse* grâce à un seul contre-exemple, que de chercher si elle est *vraie* en considérant tous ses cas possibles d'application.

La vérité par consensus
La règle précédente est d'une grande importance, car la méthode scientifique moderne de validation d'une théorie qui ne peut être prouvée de façon strictement déductive en résulte : *si aucun des spécialistes à qui la théorie a été soumise n'a pu la réfuter, par expérience ou raisonnement, on admet qu'elle est vraie*. C'est là une vérité par consensus, essentiellement provisoire, mais c'est *la* démarche admise de nos jours.

> **« Il suffit d'un seul contre-exemple pour prouver qu'une théorie est fausse. »**
>
> **« Une théorie publiée, qui est falsifiable et a été examinée par des spécialistes sans objection, est considérée provisoirement comme plausible. »**

Règle 2
Si toutes les conséquences connues d'une connaissance falsifiable sont vraies, cette connaissance est vraie *jusqu'à preuve du contraire*. Car s'il y avait quelque chose de faux dans la connaissance, il devrait se trouver également une conséquence fausse.

Donc connaissant la conséquence on peut supposer l'existence d'un principe (la possibilité d'une affirmation de portée générale), mais sans être capable de prouver ce principe. C'est seulement de l'ensemble de *toutes* les conséquences qu'on peut conclure d'un principe qu'il est vrai, et on ne les connaît pratiquement jamais toutes.

Raisonnement positif et direct (en latin : modus ponens)
Avec ce mode de raisonnement positif et direct, la difficulté vient de ce qu'on ne peut connaître *apodictiquement* la totalité des conséquences. Ce mode de raisonnement ne produit qu'une connaissance vraisemblable et hypothétiquement vraie (c'est-à-dire

vraie par hypothèse), c'est-à-dire une hypothèse inductive selon laquelle « si beaucoup de conséquences sont vraies, toutes les autres peuvent également être vraies jusqu'à preuve du contraire ».

Apodictique
Qui paraît subjectivement nécessaire ; qui a le caractère convaincant, évident d'une proposition démontrée – mais sans être démontré en toute rigueur.

Différence entre vérité formelle et vérité sémantique

Un théorème démontré dans le cadre d'une axiomatique est vrai, mais sa signification et sa valeur dans un domaine réel auquel on applique l'axiomatique ne sont pas établis par la démonstration ; celle-ci n'est que *formelle*. Ainsi, un théorème formellement établi en mathématiques peut se révéler faux ou dénué de sens dans certains cas en physique, lorsqu'on y modélise la réalité par des fonctions et équations relevant d'une axiomatique.

En somme, l'application correcte des règles de déduction et l'existence d'un théorème ne garantissent rien quant à la sémantique de ce théorème. Pour tout théorème (ou formule, ou équation…) il faudra ensuite effectuer des vérifications :

- Ce qu'il affirme ou prédit est-il conforme à la réalité expérimentale ? (l'expérience confirme-t-elle la théorie ?)
- Les conséquences qu'on en tire ne contredisent-elles pas une autre certitude ? Une seule contradiction suffit pour prouver qu'un énoncé est faux.
- Si le théorème, la formule ou l'équation décrivent une réalité physique, une vérification empirique (c'est-à-dire expérimentale) s'impose pour vérifier l'absence de résultat constituant un démenti.

8.4 Rationalisme - Principe d'universelle intelligibilité

Définition du rationalisme

C'est la doctrine selon laquelle on postule le Principe de raison déjà cité :

« Tout ce qui existe (situation) ou qui se produit (événement) a une raison d'être ou de se produire due à une loi de la nature ».

Principe d'universelle intelligibilité (en abrégé : principe d'intelligibilité)

Conséquence de la présence du mot *raison* dans la doctrine du rationalisme :

« Tout ce qui existe ou qui se produit est intelligible. »
Voir aussi *Postulat d'intelligibilité*.

Le rationalisme est basé sur la causalité. C'est la doctrine philosophique de Descartes, Kant, etc. qu'Aristote a appelée *Principe de raison suffisante*. Elle postule qu'il existe, pour tout ce qu'on observe dans la nature, une raison qui a suffi pour que cela existe ou se produise. Un rejet de ce principe permettrait que quelque chose naisse du néant, ce qui nous paraît impossible… sauf si on admet l'existence d'un Dieu créateur.

Expérience d'un objet – Connaissance empirique

- L'expérience est d'abord une connaissance acquise par les sens, l'intelligence ou les deux, et s'opposant à la connaissance innée (a priori) de l'esprit.

- C'est aussi l'acte de prendre conscience d'un objet physique par perception ; l'objet est alors présent à l'esprit sous forme de représentation que celui-ci interprète avec ses facultés d'entendement et d'intelligence. Une connaissance issue de l'expérience est dite *empirique*.

Selon le principe de raison, toute réalité s'explique par une expérience, ce qui la rend intelligible. Et puisque tout phénomène naturel a une cause et que toute cause est intelligible :

« Tout phénomène s'explique. »

En tant que doctrine métaphysique, la rationalité est une foi dans la raison, dans l'évidence et dans la démonstration.

Le principe de raison peut être appliqué pour tirer une conséquence d'un fait ou d'une hypothèse ; exemple : « Si $x > 3$ alors $x^2 > 9$ ».

Le principe de raison n'a de sens en physique que si on adopte aussi le postulat de causalité ; en pratique on pourra raisonner en invoquant directement ce postulat.

Empirisme
Doctrine qui nie l'existence d'axiomes en tant que principes de connaissance logiquement distincts de l'expérience. Pour un empiriste, l'homme a des principes innés d'origine héréditaire et culturelle, mais la connaissance du vrai ne peut reposer que sur l'expérience, en dehors de laquelle il n'y a que des hypothèses arbitraires.

Le rationalisme s'oppose à l'empirisme

Le rationalisme s'oppose à l'empirisme, en postulant que toute connaissance vient de concepts a priori, dont nous avons une connaissance innée et sur lesquels on fait des raisonnements logiques ne dépendant pas de l'expérience.

> (L'homme ne peut concevoir un objet (réel ou abstrait) qu'en construisant une représentation de cet objet à partir de concepts qu'il connaît déjà et auxquels il la relie, donc initialement à partir de *concepts de base* : c'est là une vérité scientifique. Ainsi, le concept de « ligne droite » est construit à partir de l'image d'une ligne tracée et des attributs « infinie à droite », « infinie à gauche » et « épaisseur nulle » ; la notion de « droite » est un concept de base, a priori.)

Concept de base
C'est un concept *a priori* compris intuitivement, comme le *point* ou le *temps* : on ne peut le définir à partir de concepts plus simples, il est irréductible. Descartes écrit dans [19] :
« Qu'il y a des notions d'elles-mêmes si claires qu'on les obscurcit en les voulant définir à la façon de l'École, et qu'elles ne s'acquièrent point par étude, mais naissent avec nous. »

8.5 Rationalisme critique de Karl Popper

Le rationalisme critique est la méthode scientifique actuelle en trois étapes pour trouver les lois de la nature. Elle a été proposée par Karl Popper [55].
Voici sa mise en œuvre.

1. D'abord l'homme imagine des lois pour rendre compte de ce qu'il observe et prévoir ce qu'il pourra observer. Voir *C'est l'homme qui définit les lois de la nature, et il les définit sans exception*.

2. Ensuite l'homme postule que la nature obéira à ces nouvelles lois, conformément au *Principe de la primauté de la connaissance sur les objets*.
3. Enfin, tous les scientifiques qui le peuvent vérifient les lois énoncées (leurs calculs théoriques et leurs prédictions expérimentales). Il leur suffit de trouver une seule erreur dans une nouvelle loi pour que celle-ci soit fausse.

Donc, de nos jours :

« La vérité scientifique est établie par consensus de non-erreur. »

- Une théorie ne peut être qualifiée de scientifique que si elle est falsifiable.
- Tant qu'une nouvelle loi n'a pas encore résisté à des tentatives d'en prouver la fausseté, elle est provisoire, c'est une conjecture proposée.
- Une nouvelle loi scientifique peut être entièrement expérimentale, sans base théorique ; c'est souvent le cas dans les sciences de la vie. Si elle est bien falsifiable, elle pourra être considérée comme valable provisoirement tant qu'aucun scientifique n'a formulé d'objection rédhibitoire.

  C'est pourquoi l'auteur de la loi doit la publier pour susciter des commentaires, de préférence sur Internet (dans des sites internationaux comme https://arxiv.org), et/ou dans des revues de classe mondiale comme *Nature* (https://www.nature.com/).
- Plus généralement, une loi proposée n'exige pas d'être comprise pour être valable. Il suffit :
  - qu'elle soit falsifiable ;
  - qu'elle n'ait pas d'objection connue et ne contredise pas une loi existante ;
  - et qu'elle respecte la *Règle de stabilité* pour que ses résultats soient reproductibles.

L'aptitude à réfléchir ne garantit pas des conclusions justes

Beaucoup de personnes très intelligentes ont une culture exclusivement littéraire. Leurs raisonnements peuvent alors être faussés par l'insuffisance de connaissances scientifiques : par exemple une chose qu'ils croient impossible ne l'est pas, faute de certaines connaissances mathématiques ou physiques.

Symétriquement, beaucoup de personnes de culture scientifique ignorent à peu près tout de la culture humaniste, notamment de la philosophie. Elles ne savent pas qu'un grand nombre de problèmes qu'elles rencontrent dans leur vie sociale et personnelle ont été étudiés par des penseurs du passé, qui en ont proposé des réponses intéressantes.

Le problème de la culture déséquilibrée nous concerne tous, en nous empêchant de profiter de réflexions et de solutions de valeur déjà publiées. La disponibilité du Web ne compense pas l'ignorance, et aucune personne ne peut avancer des arguments dont elle ignore jusqu'à l'existence.

Ainsi, le Prix Nobel *d'économie* 2002 a été attribué au *psychologue* Daniel Kahneman pour avoir étudié en détail ce danger et proposé des solutions [183].

Les problèmes de jugement basé sur des informations incomplètes s'aggravent lorsque notre raisonnement se base sur l'apparence du phénomène (sa représentation

dans notre esprit), fausse ou surtout incomplète, pour en utiliser les informations et conclure.

Pour minimiser le risque de ne pas prendre en compte des faits importants, il faut profiter des connaissances d'autrui, donc communiquer et interagir.

Notre jugement n'utilise que ce qu'il voit, comme si ce qu'il ne voit pas n'existait pas

Kant écrit dans [50] page 236 :
« On se trompe, non parce que l'entendement associe sans règle les concepts, mais parce qu'il néglige les détails d'un objet qu'il n'y aperçoit pas, et que l'on juge que ce dont on *n'est pas conscient* dans une chose *n'existe pas*. »

En France, Jean Tirole, prix Nobel d'économie lui aussi, a publié en 2016 un ouvrage remarquable qui aborde ce sujet, dont on trouvera un extrait intéressant dans [184].

8.6 Système de valeurs

Définitions de *valeur* selon le dictionnaire [3] :

- Evaluation d'une chose en fonction de son utilité ;
- Qualité objective correspondant à un effet souhaité, à un but donné ;
- Qualité de ce qui est désiré ou estimé, ou au contraire rejeté, redouté.

Exemples de valeurs : vérité, justice, amour, beauté, etc.

Toute valeur est en même temps objet d'un désir et objet d'un jugement : le désir est la cause, le jugement, l'arbitre ; si l'un de ces deux facteurs disparaît, il n'y a plus de valeur.

Dans l'esprit humain, chaque valeur est automatiquement associée à un ou plusieurs affects sur lesquels le jugement peut se baser.

En plus des valeurs positives précédentes, il y a bien entendu des valeurs négatives correspondant à ce qui est détesté, craint, etc.

Une valeur « secondaire » peut être créée par une réflexion ou une interprétation de situation, son importance venant après d'éventuelles valeurs plus fortes.

Les valeurs d'une personne qui s'appliquent à une situation donnée sont ordonnées ; en cas de choix entre deux valeurs, le jugement se base toujours sur la plus forte.

Les valeurs d'une personne sont toujours accompagnées d'aprioris issus de son héritage génétique, de sa culture et de son expérience, et agissant dans son subconscient. En France, par exemple, beaucoup de gens craignent les OGM et les retombées de la science ou de la mondialisation.
Voir *Les 3 catégories de circonstances qui déterminent la valeur dominante*.

La rationalité de la pensée n'est pas une valeur, contrairement à l'opinion de Kant et de Descartes, ce n'est qu'un critère de son organisation logique. Donc :

> **« La raison n'a pas de pouvoir en soi, ce n'est qu'un outil au service des instincts, pulsions et désirs dominants du moment. »**

8.7 Le pouvoir de la raison

Nous savons aujourd'hui que ce que l'homme veut (désire) à un instant donné ne dépend pas de sa raison, car *celle-ci n'est qu'un outil au service de désirs non raisonnés*. Ce qu'il veut dépend de son état psychique, lui-même dépendant seulement de son héritage génétique, de sa culture et des circonstances ; ces conditions déterminent des quantités de neurotransmetteurs, qui déterminent à leur tour l'état de neurones et de leurs interconnexions, état que la conscience interprète sous forme de valeurs critères de jugement. Nous ne savons pas déduire le détail des volontés humaines d'états psychiques, mais ce n'est pas une raison pour croire à l'existence d'une volonté indépendante transcendante, notion aussi imaginaire que celle d'âme siège du spirituel.

Un homme qui a conscience de penser et d'avoir une représentation présente à l'esprit ne fait que sentir un état psychique de son réseau de neurones, sensation accompagnée d'émissions caractéristiques de neurotransmetteurs et d'une impression de bon/mauvais, prometteur/inquiétant, etc.

8.8 Culture (définition)

Au niveau d'un groupe humain

La culture est l'ensemble des valeurs, croyances et coutumes partagées par les membres d'un groupe (peuple, fidèles d'une religion, etc.) depuis suffisamment longtemps pour que chacun les ait intériorisées : elles leur paraissent inconsciemment naturelles et indiscutables. Ce partage résulte :

- De l'histoire commune ;
- De l'environnement géographique et climatique où le groupe vit depuis des générations ;
- De la (ou des) religion(s) les plus répandues dans le groupe ;
- Des lois morales ;
- Des coutumes sociales ;
- De l'éducation transmise aux enfants par les parents ou l'enseignement ;
- Des informations diffusées par les médias ;
- Des formes d'art dominantes depuis des décennies (littérature, peinture, sculpture, danse, architecture, cinéma, cuisine, etc.) ;

Une culture comprend, par exemple :

- Des habitudes et préférences dans des domaines comme la manière d'élever des enfants, la nourriture et la cuisine, les expressions et gestes utilisés pour exprimer son opinion, les relations avec les autres dans la vie familiale ou au travail, et la discipline que chacun s'impose – par exemple pour faire des efforts ou aborder un problème complexe ;
- Des valeurs comme les canons de beauté et les critères d'honnêteté ;
- Des croyances en matière de médecine, de cosmologie, de religion et de vie après la mort ;

- Des idéologies et une éthique en matière de commerce, d'économie, de politique, etc.

La culture d'un groupe humain est en rapport avec *l'ethnie*, définie par son héritage génétique et socioculturel (en particulier la langue), l'espace géographique et la conscience de ses membres d'appartenir à un même groupe.

Au niveau d'une personne

La culture (l'acquis) résulte de celle de son groupe, qui lui a transmis ses valeurs, croyances et coutumes, ainsi que des connaissances et expériences issues de sa propre vie. Mais la culture d'une personne est sans rapport avec sa couleur de peau ou d'autres caractéristiques provenant de sa naissance : *c'est une caractéristique transmise par la vie en société*.

Il y a des différences entre culture et civilisation.

8.9 Civilisation (définition)

Une civilisation est définie par :

- une culture ;
- une organisation sociale (institutions, législation, modèle économique, etc.) ;
- et des réalisations collectives (infrastructures, sciences et techniques, architecture et autres arts collectifs, etc.).

Comparaison de civilisations

On ne peut pas parler de la supériorité d'une culture par rapport à une autre, mais une civilisation peut être supérieure à une autre dans la mesure où elle permet aux hommes une vie plus conforme à leurs valeurs culturelles et sociales.

Ainsi, des institutions permettant le règne de la justice, la sécurité, la solidarité, la préservation de la santé, l'enseignement et la démocratie correspondent à des valeurs désirables ; il en est de même pour des *réalisations collectives* permettant de se soigner, de s'instruire, de se distraire, de voyager, de bénéficier d'avancées technologiques et de réalisations artistiques ambitieuses.

8.10 Les 3 déterminants des valeurs selon la psychologie cognitive

Problème de la valeur dominante

Kant croit que l'homme a le pouvoir de déterminer librement ses actes et d'imposer à sa volonté d'être bonne, c'est-à-dire d'être régie par la raison et le devoir en surmontant ses inclinations. Voici un point de vue moderne qui nie l'existence d'un tel libre arbitre.

> **« Il n'y a pas de pensée qui ne vienne du corps. »**
> (Toute pensée est une interprétation par le cerveau de son propre état ;
> voir ci-dessus *Interprétation - Processus de la conscience*)
>
> **« Toute pensée a pour cause une émotion, se poursuit et s'achève avec de l'émotion. »**

La pensée de l'homme n'est qu'un outil au service de ses pulsions et désirs du moment : chaque fois qu'il réfléchit, l'homme cherche une solution pour satisfaire un

désir ; il n'existe pas de réflexion sans but affectif, et un tel but est caractérisé par une valeur qui domine toutes les autres pour cette réflexion. C'est là un principe de causalité de la réflexion humaine, une partie du déterminisme humain. La psychologie moderne enseigne que la raison, la rationalité, la logique et la cohérence ne sont pas des valeurs.

Problème de la pensée libre

Il y a des circonstances où un sujet se sent si peu concerné qu'il peut réfléchir librement (sans être perturbé par des émotions, inclinations ou préjugés), par exemple pour calculer quel jour de la semaine tombait le 14 juillet 1789. Mais, dès que le résultat attendu d'une réflexion a une importance émotionnelle, il apparaît un problème de liberté : l'homme peut-il réfléchir librement, sans contrainte ? Lorsque sa réflexion aboutit à une décision, est-il libre de choisir ce qu'il veut ?

Les 3 catégories de circonstances qui déterminent la valeur dominante

Trois catégories de circonstances déterminent le contexte dans lequel notre psychisme (conscience et subconscient) fonctionne, c'est-à-dire ses valeurs :

1. L'inné (héritage génétique) [57] ;
2. L'acquis (culture reçue, formation et éducation, expériences vécues) ;
3. Les circonstances (contexte du moment), comprenant :
   - Une situation réelle (exemples : danger immédiat, opportunité, faim…).
   - Un futur imaginé, déterminant sens de la vie ou de l'action (pourquoi me donner du mal, quel espoir ai-je, que peut-il m'arriver…).

     Ainsi, un homme jugera une même tâche insupportable, désagréable ou très supportable selon l'avenir qu'il imagine s'il l'accomplit ; par exemple :
     - ✓ *Insupportable* s'il est obligé de l'accomplir pendant très longtemps sans profit personnel identifiable, comme un condamné aux travaux forcés ;
     - ✓ *Désagréable* si en l'accomplissant il gagne de quoi vivre, ce qui justifie de supporter le désagrément ;
     - ✓ *Très supportable* si en l'accomplissant il participe à une œuvre admirable qui lui vaudra le respect de son entourage.
   - L'interprétation du contexte et de l'acquis par le subconscient, qui produit des jugements de valeur non exprimés par des mots, mais ressentis et pris en compte.

A un instant donné, l'héritage et l'acquis d'une personne déterminent *ce qu'elle est* ; les circonstances déterminent *des contraintes, des opportunités* et *l'avenir qu'elle imagine*.

L'inné ne change que très peu pendant la vie d'un individu, car l'adaptation de son génome et des mécanismes par lesquels il s'exprime à ses conditions de vie est modeste et lente [57]. L'acquis s'enrichit chaque fois que nous apprenons quelque chose et s'appauvrit à chaque oubli ou déformation des informations mémorisées. Les circonstances changent évidemment tout le temps.

Conclusion : l'homme agit exclusivement en réponse au désir dominant du moment, qui résulte de la valeur qui domine son ressenti ; en ce sens-là, il n'a pas de liberté. Si un militaire prisonnier préfère subir la torture au lieu de révéler un secret à l'ennemi, c'est que son patriotisme domine sa douleur.

L'imprévisibilité de l'homme

Les mécanismes génétiques et psychiques peuvent créer des comportements humains imprévisibles du fait de leur complexité, de l'influence du subconscient, d'un acquis variant sans cesse et de contextes toujours différents. Cela n'a pas de rapport avec le déterminisme et ne prouve pas l'existence du hasard.

Les universaux, part importante de l'inné humain

Définition

Dans ce texte on appelle *universaux* des concepts universels, applicables à tous les hommes, quelles que soient leur race, leur origine géographique et l'époque. Ils caractérisent la culture, la société, le langage, le comportement et la psychologie d'une manière semblable pour toutes les sociétés humaines connues dans l'histoire.

Les universaux *moraux* sont des concepts toujours associés à des affects provoquant automatiquement, instinctivement, un jugement de valeur dans tout esprit humain. Ils concernent notamment :

- Une distinction entre le bien et le mal ;
- L'interdiction de faire violence à autrui (assassinat, torture, viol…) ;
- La honte et les tabous ;
- L'aptitude à s'identifier à autrui ;
- Les droits et les devoirs ;
- La justice, l'équité, l'honnêteté ;
- Rendre le bien pour le bien et le mal pour le mal ;
- L'admiration de la générosité ;
- L'obligation de punir le tort fait à la société, etc.

Les universaux *culturels* ne représentent pas toute la culture ; ils ne représentent que la partie de chaque culture commune à toutes (en termes mathématiques on dirait « l'intersection des divers ensembles de valeurs, croyances et coutumes constituant les cultures particulières »).

Exemples d'universaux

- Dans [149] pages 285 à 292 on trouve une liste de 202 universaux qui ont un rapport avec la morale et la religion. En voici quelques-uns :
  - *Affection exprimée et ressentie* (nécessaire pour renforcer l'altruisme et la coopération) ;
  - *Statut social des aînés* (élément vital de la hiérarchie sociale, de la dominance, du respect pour la sagesse des aînés) ;
  - *Anthropomorphisme* (base de l'animisme, des dieux anthropomorphiques des Grecs et Romains, attribution de traits moraux humains aux dieux) ;
  - *Anticipation* (vitale pour tenir compte des conséquences de la situation présente), etc.

- Liste de quelque 200 universaux parmi 373 identifiés par Donald E. Brown [150], dont voici un court extrait où les universaux sont classés par catégories :
  - time; cyclicity of time; memory; anticipation; habituation; choice making (choosing alternatives); intention; ambivalence; emotions; self-control; fears; fear of death; ability to overcome some fears; risk-taking;
  - daily routines; rituals;
  - adjustments to environment; binary cognitive distinctions; pain; likes and dislikes; food preferences; making comparisons;
  - sexual attraction; sexual attractiveness; sex differences in spatial cognition and behavior;
  - self distinguished from other;
  - mental maps; territoriality; conflict;
  - sweets preferred; tabooed foods;
  - childbirth customs; childcare; females do more direct childcare; preference for own children and close kin (nepotism)…

Origine des universaux
Les universaux résultent d'une structure psychologique commune à tous les hommes, que les divers parcours historiques et ajouts culturels n'ont pu que compléter sans en modifier les caractéristiques.

L'existence des universaux s'explique par une base biologique et génétique commune à tous les hommes et une évolution identique. A un instant donné de l'histoire de l'humanité, les universaux sont des caractéristiques d'une nature humaine universelle, et de la partie de cette nature qui n'a pas été modifiée depuis des millénaires par une culture ou des faits historiques particuliers. Ils font donc partie de « l'inné » (par opposition au reste de la culture, qui fait partie de « l'acquis »). Historiquement, les universaux ont évolué au même rythme que l'espèce humaine, sous l'influence de la sélection naturelle puis socioculturelle, progressivement et sur une durée de l'ordre de dix à cent mille ans.

> **« Les universaux constituent une part importante du déterminisme humain. »**

Conséquence de l'existence des universaux : dignité et égalité des droits
Source : [151]

Tous les êtres humains ont la même dignité et les mêmes droits, quels que soient leur pays d'origine ou de citoyenneté, leur couleur de peau, leur sexe, leur religion, etc. Ces droits sont inhérents au fait même d'être homme et sont inaliénables.

Cette égalité est inscrite dans la *Déclaration universelle des droits de l'homme des Nations unies* [152] adoptée le 10 décembre 1948 et reconnue aujourd'hui par *tous* les 193 états membres des Nations unies. Mais entre la reconnaissance écrite et la démocratie réelle…

8.11 Le libre arbitre

Définition du libre arbitre

Le libre arbitre est le pouvoir de choisir un acte en toute indépendance ou de ne rien faire, en échappant (croit-on) au déterminisme causal de la nature.

Remarquons d'abord qu'une liberté absolue est impossible : pour choisir, l'homme doit d'abord vivre, ce qui suppose des facultés de raisonnement limitées et orientées par son héritage génétique et ses connaissances (culture, expériences) du moment. Et tout choix se fait dans un contexte, circonstances dont il faut aussi tenir compte. Ce contexte comprend d'abord les lois de la nature, dont aucune action physique ne peut s'affranchir ; il comprend ensuite les déterminants des valeurs humaines à la base de tous ses désirs (voir *Les 3 catégories de circonstances qui déterminent la valeur dominante*).

Idéaliste, Kant croit aussi en une liberté de l'esprit, basée sur la Raison, qu'il considère aussi comme toujours libre. Mais la neuropsychologie moderne montre que la Raison n'a aucun pouvoir, c'est un outil soumis aux désirs humains issus des trois déterminants précédents : génétique, acquis (culture, expérience) et contexte de l'instant.

Concernant le déterminisme causal, celui des lois de la nature, il faut rappeler qu'aucune action transcendante n'est possible d'après notre science : la pensée humaine ne subit aucune influence d'un autre être pensant, fut-il divin ; elle nait et demeure dans les limites de notre cerveau. Elle est donc libre de toute influence transcendante.

La pensée humaine est limitée par les possibilités matérielles de l'appareil cognitif : l'homme ne peut penser que ce que son cerveau lui permet de penser, avec son pouvoir de réflexion, sa mémoire, son imagination, ses schémas mentaux… Il a l'impression d'être libre de choisir, mais cette liberté est bornée par ces limites mentales.

L'homme fait des choix parce qu'il a un désir à satisfaire : il choisit *comment* le satisfaire. Il évalue chaque choix qu'il croit possible en fonction de ses valeurs du moment. Il a l'impression d'être libre de juger et de décider. Il n'est pourtant maître ni de son héritage génétique, ni de son expérience, dont une partie est intériorisée et se manifeste de manière subconsciente. Sa liberté est réduite aux choix qui dépendent des circonstances, qu'il évaluera en fonction de ses valeurs innées et acquises. Le choix est donc toujours ramené aux mêmes valeurs, l'inné et l'acquis, dont l'homme n'est pas maître. Et son jugement n'est pas libre non plus : ce qu'il a de rationnel n'est pas libre par définition, puisque soumis à la Raison universelle, et ce qu'il a d'irrationnel résulte d'affects non maitrisables et de l'effet de son subconscient. L'impression de liberté de l'homme est donc illusoire, sa liberté ne peut être absolue.

> Rappelons ici que la raison n'est pas une valeur, ce n'est qu'un outil au service des affects. Elle régit la découverte des possibilités et de leurs conséquences, ainsi que la manière d'évaluer celles-ci en fonction des valeurs, elle ne définit aucune valeur.

C'est ainsi que l'homme prend une décision (librement, croit-il) en fonction de ce qu'il sait, qu'il imagine et qu'il ressent au moment où il la prend. Mais ce qu'il sait, imagine et ressent peut être fortement influencé par son entourage, surmoi qui exerce une pression sociale, ou par des informations fausses, par exemple trouvées sur Internet.

L'Internet
De telles informations sont générées sur-mesure pour chaque internaute, par des applications qui connaissent son profil (ses désirs, ses craintes, ses coordonnées, ses achats passés, ses recherches, etc.) suite à des navigations précédentes ; ce profilage systématique des utilisateurs du Web est fait par les outils de recherche comme Google et Bing, par les réseaux sociaux comme Facebook, par des vendeurs comme Amazon, et par des centaines de sociétés spécialisées qui revendent ensuite les profils. Tous ces prestataires de services accumulent les données fournies par chaque utilisateur pour les utiliser en l'influençant, ou les revendre à des entreprises ou des organisations politiques. Ceux qui génèrent de telles informations sur-mesure, à chaque dialogue, ne le font pas pour diffuser la vérité mais pour servir leurs intérêts, et à force de recevoir encore et encore des informations allant dans le même sens beaucoup d'internautes sont influencés et perdent une part de leur liberté.

L'utilisateur du Web et des réseaux sociaux devrait donc savoir qu'il ne peut plus *se* faire confiance, parce qu'il est espionné, manipulé et le sera de plus en plus.

Considérations philosophiques sur le déterminisme et le libre arbitre

Traditionnellement, la philosophie distingue deux cas :

1. Les décisions humaines sont libres lorsqu'il n'y a pas de contrainte ou de loi ; rien n'empêche alors un homme de faire ce qu'il veut :
    - ni les lois naturelles, le progrès scientifique et l'accumulation de moyens permettant à l'homme les actes les plus extraordinaires ;
    - ni les règles morales, les nombreux matérialistes athées ne se sentant pas tenus d'en respecter.
2. Les décisions humaines ne sont pas libres parce qu'il y a des lois morales, des coutumes et des lois juridiques.
    - Les lois morales ont une origine ancienne, sous l'influence des universaux et des religions ;
    - Les coutumes appartiennent aux ethnies, conséquences de leurs valeurs ;
    - Les lois juridiques ont été définies par les sociétés en même temps que se structurait leur civilisation.

La thèse d'absence de libre arbitre est combattue

La thèse d'absence de libre arbitre de l'homme est combattue par certains philosophes, qui n'arrivent pas à admettre que l'homme soit une sorte de machine, que la vie et la pensée soient un ensemble de phénomènes soumis au déterminisme de la nature. Voici ce que le mathématicien René Thom écrit dans [63] :

« Si l'on essaye d'analyser pourquoi les esprits manifestent une telle réticence à l'égard du déterminisme, on peut, je crois, invoquer deux grandes raisons :
1. Il y a d'abord ceux qui tiennent à sauver le libre arbitre humain. […]
2. Il y a enfin le groupe de ceux qui se sentent opprimés par la montée croissante des technologies, par la collusion de la science et du pouvoir. »

La thèse d'absence de libre arbitre est aussi combattue par un matérialiste athée, le philosophe André Comte-Sponville dans le texte [45] pages 42-43 (où on trouve aussi l'excellent texte *De la vraie nature du matérialisme et de la séduction légitime qu'il exerce*). Ce philosophe affirme des choses fausses par compréhension insuffisante du déterminisme : il croit au hasard et à la contingence des événements.

Impossibilité d'expliquer le libre arbitre

La liberté et le libre arbitre ne s'expliquent pas ; ils ne résultent d'aucune cause particulière, ils ne sont déterminés par rien car ce sont des absences de contraintes. L'homme est certain d'en profiter parce qu'il sait que rien ne l'empêche de penser, et il n'est pas conscient de ses aprioris et de ses mécanismes cognitifs et affectifs inconscients ; c'est une certitude purement psychologique.

Le déterminisme affirme une absence de liberté de la nature : chaque situation détermine l'évolution qui va la transformer, évolution soumise aux lois de la physique.

La volonté n'a pas de pouvoir en elle-même

Pour échapper au déterminisme de sa nature, un homme doit avoir une volonté capable de dominer ses instincts et pulsions. Cette condition est irréalisable, dans la mesure où :

- la volonté n'est qu'un outil au service de valeurs existantes ;
- l'homme n'est pas conscient de certaines valeurs et mécanismes cognitifs et affectifs, qui pourtant orientent ses désirs et sa pensée.

L'homme est toujours insatisfait

A tout moment, un homme a des aspirations du fait même qu'il vit, et il en est conscient. Lorsqu'il a l'impression que ces aspirations sont vraiment les siennes, qu'elles ne lui ont pas été imposées, et qu'il ne dépend que de lui d'agir pour tenter de les réaliser - et par là de se réaliser, *l'homme se dit libre* et on dit qu'*il jouit de son libre arbitre*. Ses libres choix se font en fonction de ses valeurs, certaines conscientes et d'autres non.

En fait, l'homme se dit libre de ses choix tout en sachant que la vie en société lui impose des lois, des coutumes et la pression de l'opinion des autres ; mais comme ces limites à sa liberté d'action lui paraissent normales, il n'en souffre pas trop et s'estime globalement libre de ses choix. Ou au contraire, s'il est de nature rebelle, il trouvera excessive l'obligation de conduire en respectant les règles de priorité ou de limitation de vitesse. Ces exemples illustrent le caractère subjectif de l'impression de liberté.

Le libre arbitre selon Sartre

Sartre a montré dans [190] que la conscience de l'homme constate à tout moment une insatisfaction, un manque de quelque chose que Sartre appelle « *manque d'être* » ou « *non-être* ».

Cette opinion est confirmée par des recherches récentes : l'auteur de [191] confirme que le mécanisme biologique de satisfaction du cerveau humain rend hors d'atteinte une satisfaction totale, en ne permettant au mieux qu'une satisfaction partielle laissant subsister certains désirs.

Le psychisme de l'homme réagit à cette insatisfaction en générant sans cesse des besoins physiques et des désirs psychologiques. Certains de ces besoins et désirs franchissent le seuil de conscience, déclenchant ainsi une réflexion, d'autres restent inconscients tout en exerçant une influence.

Pour Sartre, *l'homme jouit d'un libre arbitre parce qu'il a une conscience* ; et sa conscience échappe au déterminisme, car elle lui permet de penser juste ou faux, et même d'être de mauvaise foi lorsque la bonne foi le conduirait à des conclusions qui le dérangent.

Pour Sartre, le caractère transcendant (c'est-à-dire échappant aux lois déterministes de la nature) du libre arbitre de l'homme n'a pas à être prouvé, c'est une simple conséquence de la manière de fonctionner de sa conscience. Celle-ci est libre *par nature*, ses désirs provenant du « manque d'être » de l'homme, c'est-à-dire de son psychisme qui constate à tout instant que quelque chose lui manque ou lui déplaît. En somme l'homme jouit de son libre arbitre, mais pas au point de pouvoir s'empêcher de désirer quelque chose : même sage, il souffrira toujours de manque d'être.

Le libre arbitre de l'homme le rend responsable de ses actes, bien sûr, mais aussi de ce qu'il cherche à devenir : pour Sartre, l'homme se fait lui-même, librement.

En constatant avec raison que l'homme ne peut jamais s'empêcher de désirer quelque chose, Sartre contribue à la compréhension de la nature humaine. Il suit aussi Freud, qui attribue à l'inconscient de l'homme tous ses désirs profonds. Aucun homme ne peut chercher à diriger sa pensée consciente dans une direction contraire à ses désirs inconscients, qui correspondent à l'idée qu'il se fait de ce qui est bien, pour lui-même et pour tous ses semblables.

Le problème de la responsabilité

Si on admet que l'homme n'a qu'un libre arbitre illusoire il n'est jamais responsable de ses actes, qui peuvent toujours être imputés à un désir ou une pulsion dont il n'est pas maître et dont la valeur instantanée est prépondérante dans sa décision.

Ce raisonnement peut convenir à un individu, mais il est inacceptable pour la société où il vit. La vie en société n'est pas possible si les citoyens ne respectent pas des règles définies par la culture et par la loi. Il faut donc que le non-respect d'une telle règle soit reproché à son auteur, ce qui est impossible s'il n'est jamais responsable.

La société a donc prévu des « bons usages », règles de vie non écrites faisant partie de la culture, et des lois écrites prévoyant des obligations et les sanctions des actes répréhensibles. Ces règles et lois se traduisent, chez tout citoyen, par des valeurs qui doivent le dissuader de les transgresser : je ne vole pas mon voisin parce que cela peut me faire mettre en prison ; on ne me pardonnera pas si j'invoque un désir irrépressible de m'approprier son bien.

Avec ces bons usages et ces lois, les valeurs de chaque citoyen comprennent des garde-fous lui permettant de choisir parmi les possibilités permises… en principe. Son libre arbitre n'est plus aussi libre, au nom de la vie en société.

8.12 Conclusions sur le déterminisme cognitif humain

Schématiquement, le déterminisme cognitif humain regroupe :

- D'une part le Déterminisme général, pour rendre compte de la faculté de raisonner logiquement ;
- D'autre part le Déterminisme génétique avec ses universaux, pour rendre compte des mécanismes cognitifs innés. Mais ce déterminisme-là est lui-même au service des pulsions et désirs, et sujet à des erreurs, des jugements de valeur basés sur des aprioris et des fonctionnements subconscients.

9 Réflexions sur la connaissance, le jugement et la décision

Remarques préalables

A la différence de la nature :

- L'homme se souvient du passé et transmet des caractères par hérédité ; voir :
  - *Programme génétique et déterminisme* ;
  - *Les universaux, part importante de l'inné humain*.
- L'homme réfléchit, anticipe et s'adapte (par exemple par entraînement sportif), alors que la causalité naturelle est automatique et sans nuance.

Compte tenu des facultés humaines de mémoire et de pensée irrationnelle, le comportement humain ne peut être déterministe aux sens précédents.

- La mémoire est sujette à oublis partiels, erreurs, etc.
- La pensée humaine n'est pas souvent rationnelle, car le subconscient intervient constamment. En outre, l'esprit ne raisonne qu'en fonction de désirs dont sa raison est esclave ; il est aussi prisonnier de préjugés, d'archétypes et de valeurs culturelles.

Le déterminisme humain est donc très différent du déterminisme de la nature.

9.1 Déterminisme du vivant

Définitions du vivant

- Parmi d'autres définitions, [131] définit l'être vivant comme « un système chimique autonome capable d'évolution darwinienne ». Cette définition simple sous-entend la possibilité pour cet être de subsister dans son milieu, de se reproduire et d'évoluer d'une génération à la suivante sous le contrôle de la sélection naturelle. Mais elle ne rend pas compte des multiples autres caractéristiques d'un être vivant.
- Autre définition : « Un être vivant est une structure […] constituée, pour tout ou partie, d'une ou de plusieurs molécules d'acides nucléiques (ARN et ADN) programmant le déroulement vital ; cette structure constitue le patrimoine génétique dont la propriété première est de pouvoir se répliquer. »

Un être vivant absorbe de la nourriture, la transforme en sa propre substance et en énergie thermique et mécanique. Il s'adapte à son milieu, se défend contre des agressions et se reproduit.

Une forme de déterminisme existe bien dans le domaine du vivant sous la conduite du programme génétique. Certains mécanismes déterministes assurent la vie des cellules, d'autres la réplication héréditaire, d'autres la résistance aux agressions de l'environnement, d'autres encore l'adaptation à des conditions de vie qui changent. Le programme génétique est auto-adaptatif dans certaines limites, cette autoadaptation étant une caractéristique du déterminisme dans le cas des êtres vivants. Nous approfondissons ce sujet, qui impacte fortement la définition du déterminisme humain en annexe dans *Niveaux d'information biologique et déterminisme génétique*.

Déterminisme génétique

Mais d'ores et déjà nous pouvons affirmer que les êtres vivants sont soumis à un *déterminisme génétique*, qui est adaptatif et agit à long terme par mutation du génome dans l'hérédité, ou à court terme par modification de l'expression de gènes dans l'adaptation aux conditions de vie [57].
Nous reviendrons sur ce sujet dans *Conclusions sur le déterminisme génétique*.

Voir aussi les universaux, à l'origine d'une part importante du déterminisme humain dans le paragraphe *Les universaux, part importante de l'inné humain*.

Vie, organisation, complexité et entropie

En recourant à un dualisme simple, la vie est caractérisée par deux sortes d'organisations, dont l'ordre s'oppose au désordre du hasard ou à l'ordre plus simple de la matière inanimée :

- L'organisation architecturale, statique :
  - *du code génétique*, dont la structure constitue un programme qui détermine des fonctions comme la génération des protéinées et la spécialisation des enzymes ;
  - *des cellules*, dont il existe de nombreux types spécialisés différents (les cellules du sang sont d'un type différent de celles des neurones…).
- L'organisation fonctionnelle, dynamique, qui coordonne par exemple les milliers de réactions chimiques des fonctions vitales de l'être vivant. Dans cette organisation, on trouve aussi bien des rythmes réguliers, périodiques, comme celui du cœur, et des mécanismes arythmiques comme les processus neurologiques du cerveau.

Ces deux sortes d'organisations sont intimement liées, chacune agissant sur l'autre.

Tout être vivant est un système dissipatif : il échange constamment de la matière et de l'énergie avec son environnement, d'où son instabilité permanente, thermodynamique et chimique, instabilité et échanges qui ne prennent fin qu'avec la mort. Pendant toute sa vie, des parties de cet être sont détruites et crées, l'instabilité étant une condition nécessaire du fonctionnement de ses processus vitaux et de l'auto-organisation qui lui permet de s'adapter constamment à son environnement [178].

Le deuxième principe de la thermodynamique

L'élaboration d'un être vivant à partir de molécules (quand il se nourrit ou se développe) constitue une complexification, un progrès vers l'organisation de la matière. Cette complexification diminue l'entropie de l'être vivant qui s'organise, en augmentant celle de son environnement. Le deuxième principe de la thermodynamique (augmentation nécessaire de l'entropie du système global) est bien respecté, tandis que la diminution d'entropie de sa partie être vivant résulte d'un processus particulier : la dissipation d'énergie et l'échange de matière par l'être qui vit et se trouve loin de l'équilibre thermique et chimique.

> *Entropie*
> Toute transformation d'un système isolé comprenant un échange d'énergie est soumis à une loi physique très générale : *globalement il ne peut que se désorganiser*. Cette désorganisation est évaluée par une grandeur, l'entropie, qui ne peut qu'augmenter. Mais une partie de ce système peut évoluer vers plus

d’organisation, son entropie décroissant au prix d’une croissance de celle du système global. Ainsi, l’entropie globale de l'Univers augmente sans cesse.

« L'entropie d'un système isolé qui subit des transformations avec échange d'énergie est toujours croissante. »

La complexification des êtres vivants résulte d'une succession d'instabilités, sans lesquelles la vie ne peut subsister. Notre conception du déterminisme doit donc tenir compte, dans ses lois d'interruption, des exigences d'instabilité, et de dissipation d'énergie et de matière de la vie.

« Les systèmes dissipatifs peuvent évoluer par autostructuration vers plus de complexité et plus de diversité. »

9.2 La thermodynamique ne contredit pas la doctrine matérialiste

Certains idéalistes ont invoqué la thermodynamique pour faire triompher leur doctrine de création divine du monde contre celle des matérialistes :

> « Puisque la vie naît et se développe en s'organisant, donc en diminuant l'entropie, elle ne peut résulter exclusivement de processus matérialistes dominés par la thermodynamique, car le deuxième principe de celle-ci s'oppose à une telle organisation ; donc la création et le développement du vivant ont lieu par des processus échappant à la thermodynamique, donc non exclusivement matérialistes ; donc la transcendance de Dieu est nécessaire ».

Ils oublient que la thermodynamique s'applique aux systèmes *au voisinage de leur équilibre thermodynamique et fermés*. Or le système d'un être vivant est en déséquilibre permanent ; en outre il n'est pas fermé, car il comprend aussi son environnement : il n'y a pas de vie sans échanges de nourriture, de travail, de chaleur, de déchets et de gaz. L'organisation à entropie décroissante de la partie vivante est plus que compensée par la désorganisation de ce qui l'entoure.

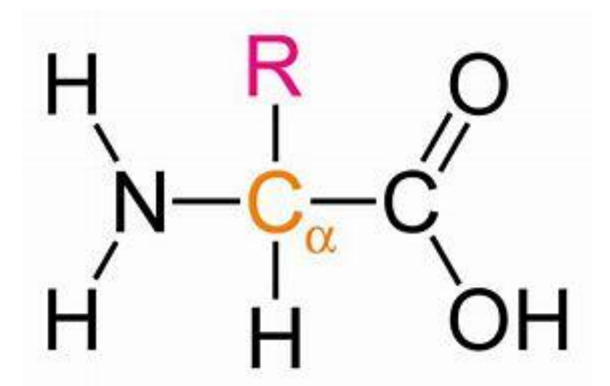
La nourriture inerte ne se transforme pas *toute seule* en être vivant complexe, elle le fait dans le cadre d'un système être vivant + nourriture + environnement ; la complexité qui se crée dans l'être vivant (par exemple lorsqu'un bébé qui grandit devient enfant) est accompagnée de désorganisation dans son environnement, l'entropie *de l'ensemble* augmentant bien.

9.3 Programme génétique et déterminisme

Un corps humain a entre 50 et 100 trillions de cellules (50 à 100 **.**10^{12}). Chaque cellule d'un corps humain comprend 23 paires de *chromosomes*, chaînes de molécules responsables de l'hérédité et comprenant des sous-chaînes appelées *gènes*. Dans chaque paire, un des chromosomes provient de la mère et l'autre du père.

Acide aminé

Un acide aminé est une molécule contenue dans la plupart des protéines. Son nom vient de ce qu'elle porte une fonction acide COOH et une fonction basique amine NH_2. Elle porte en plus un radical R qui caractérise les 20 acides aminés connus.



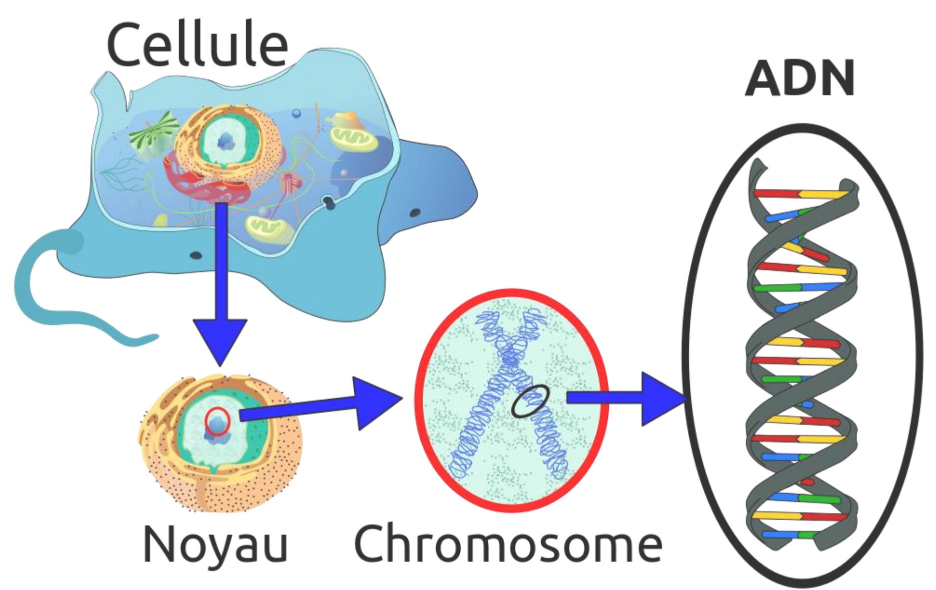
Structure d'un acide aminé (© Microsoft Bing Creative Commons)

Gènes et programme génétique

Les gènes sont des longues chaînes d'acides aminés porteurs des instructions (au sens programme informatique) de fabrication d'environ 100 000 protéines différentes intervenant dans la vie cellulaire.

Selon [267], chacun des quelque 21 000 gènes humains (chacun constitué par des millions de paires de bases formant un segment d'ADN) participe à un ou plusieurs caractères héréditaires, dont il contribue à la transmission.

La structure et les fonctions de chaque cellule sont définies par un *programme génétique* dont les instructions et données sont stockées dans les structures de molécules d'ADN des chromosomes, des plasmides, des mitochondries et des chloroplastes.



Localisation de l'ADN dans une cellule d'eucaryote - Licence Wikimedia Commons
(Les eucaryotes sont les animaux, les végétaux verts et les champignons)

Le génome peut être considéré comme un programme dont l'exécution (un informaticien préciserait : *l'interprétation de l'ADN*) crée des protéines et des cellules vivantes par l'intermédiaire de mécanismes appropriés mettant en jeu l'ARN [268]. L'existence et le fonctionnement de ce programme génétique font de la création de ces protéines et cellules un phénomène déterministe.

Il y a une analogie entre le couple de mécanismes (génération des protéines par interprétation de l'ADN + régulation par l'ARN) et le couple (lois d'évolution + lois

d'interruption) : une loi physique d'évolution est régie une loi d'interruption, qui peut en lancer l'exécution en lui passant des paramètres, puis l'arrêter. Malgré l'infinie complexité des mécanismes de la machinerie cellulaire, leur logique est entièrement décrite par le code ADN, et certaines séquences du reste du génome encore mal connues : il n'y a ni magie, ni intervention transcendante. Voir [57].

Toutes les cellules d'un individu donné possèdent le même génome, provenant d'une seule cellule initiale, l'œuf. Mais un mécanisme de différenciation permet, à partir de l'œuf fécondé initial et avec ce même génome, la création d'un grand nombre de types différents de cellules, environ 200 chez l'homme : cellules de la peau, des muscles, du sang, des neurones, etc. Chaque type est spécialisé et présente une morphologie et un fonctionnement propres. Le fonctionnement des divers gènes peut être bloqué ou activé par des commutateurs logiques, dont la position (oui/non) dépend du programme ADN et de la position de la cellule parmi d'autres cellules, dans une partie du corps.

9.4 Déterminisme général des fonctions vitales

Sources : [316], [317]

A l'échelle atomique le corps humain, comme celui de tout être vivant, fonctionne en formant des molécules, par exemple celles des protéines, ou en associant des molécules par liaison chimique. Ainsi, l'attachement d'un radical méthyl (CH_3) sur un gène d'une cellule (opération appelée méthylation) peut inhiber celui-ci, l'empêcher de s'exprimer. La décision d'inhiber ou de désinhiber un gène est prise par interprétation du programme ADN et du contexte (comme la position de la cellule par rapport à des cellules voisines) ; la décision de la quantité d'une protéine qu'il faut produire est prise de la même façon.

Toute liaison chimique d'un attachement ou détachement, opération de biologie moléculaire, est régie par l'équation de Schrödinger, elle-même régie par le Déterminisme statistique. A l'échelle atomique, la vie est donc régie par ce déterminisme-là.

« A l'échelle atomique, la vie est régie par le Déterminisme statistique. »

La biologie moléculaire est une science exacte, dont les prédictions d'évolution sont statistiques. Une liaison moléculaire, par exemple, a une probabilité de s'établir et une probabilité de se défaire une fois établie ; selon le contexte (température, milieu ambiant...) elle sera plus ou moins facile à établir ou à rompre.

Mais connaissant les lois de la biologie moléculaire on ne peut pas en déduire celles des fonctions vitales ; exemple : le foie a plus de 500 fonctions différentes. Le passage des lois de l'échelle atomique à des lois de l'échelle macroscopique comme celles qui régissent les fonctions du foie est régi par la logique de l'ADN et des mécanismes cellulaires, qui peut donc supporter une grande complexité. Le fonctionnement des êtres vivants est donc régi par des algorithmes, donc par le Déterminisme général.

« Les fonctions vitales sont régies par des algorithmes dans le cadre du Déterminisme général. »

Cela ne permet pas, hélas, d'affirmer que les actions d'un être vivant sont prévisibles, même au sens de la certitude statistique, dans la mesure où les décisions d'action dépendent aussi de fonctions impossibles à décrire avec précision comme celles du subconscient humain et celles du système de valeurs.

9.5 Déterminisme de l'hérédité

L'hérédité fait, par exemple, que des chats engendrent des chats de la même espèce : le programme génétique est donc transmis à la fois chez un même individu à partir de l'œuf initial, et d'un individu à ses descendants par hérédité. Il y a un déterminisme inscrit dans le programme génétique qui garantit la reproductibilité de ces deux types de transmissions, ainsi que la différenciation en types spécialisés de cellules.

Le programme génétique ne peut s'exécuter correctement que dans certains contextes. Ainsi, par exemple, certaines protéines ne sont synthétisées que si certaines parties du programme se sont déjà déroulées correctement auparavant : nous retrouvons ici une loi procédurale d'interruption.

Le programme génétique est interprété pour générer des protéines. Mais cette génération elle-même exige la présence de certaines protéines. La logique de génération répond au schéma simple acteurs + régulateurs, analogue au schéma loi d'évolution + loi d'interruption. Comme nous l'avons vu plus haut, l'expression de gènes est régie par des commutateurs. A long terme, par exemple lors de la transmission entre générations, cette expression relève de l'épigénétique.

Gènes et comportement humain

Chaque mois qui passe, les chercheurs découvrent de nouvelles propriétés des gènes concernant leur influence sur le comportement humain. Parfois un seul gène est associé à un comportement, parfois il en faut plusieurs [57]. La terrible maladie de Huntington est associée à un seul gène, la mucoviscidose aussi.

L'ouvrage [57] pages 130-131 cite le gène D4DR, situé sur le chromosome 11 : le nombre d'occurrences de ce gène sur le chromosome détermine le niveau de production de *dopamine*, un *neurotransmetteur*.

> *Dopamine*
> Les sensations *positives* de désir, d'euphorie, etc. sont régulées dans le cerveau humain par une molécule, *la dopamine* ; (ne pas confondre *désir* et *plaisir* : ce dernier utilise d'autres mécanismes que le premier).
>
> Les sensations *négatives* sont associées à *l'acétylcholine*, neurotransmetteur qui a des effets vasodilatateurs sur le système cardiovasculaire et agit sur le rythme cardiaque, des effets sur le système gastro-intestinal, des effets inhibiteurs sur l'activité du système nerveux central, etc.
>
> Dans notre cerveau, la comparaison à une valeur produit la présence détectable et l'abondance mesurable d'une molécule organique. La création de valeur (agréable=bon, désagréable=mauvais) en tant que conséquence d'une perception ou de pensées, et son utilisation dans les comparaisons nécessaires aux jugements, sont des phénomènes physiques automatiques, inévitables - bref déterministes.
>
> *Neurotransmetteur*
> Message chimique d'un neurone destiné à stimuler ou inhiber l'activité d'un autre neurone. La dopamine, par exemple, est un neurotransmetteur.

La dopamine stimule l'activité de l'organisme : son absence ou un trop faible niveau entraînent la léthargie, tandis qu'une surabondance entraîne la suractivité, la recherche de la nouveauté, le désir et la prise de risques. Exemple cité par [135] : des

mésanges qui font preuve de plus de curiosité que les autres ont la même forme particulière du gène D4DR que les humains particulièrement curieux.

Mais il ne faut pas penser que les séquences de gènes D4DR expliquent *à elles seules* la tendance d'une personne à rechercher ou non la nouveauté et à être ou non hyperactive ; elles n'en expliquent qu'une petite partie. Dans la plupart des expériences sur la relation entre gènes et comportement, on trouve des explications partielles, des corrélations, et il faut plusieurs gènes pour expliquer un comportement. Plus généralement, la génétique intervient pour une partie du caractère inné d'un trait de personnalité ou d'une aptitude, mettons 20 % à 60 % de la variance ([57] page 4), et l'acquis culturel pour le reste. Et la proportion varie avec le trait considéré et l'individu. (Voir les exemples [136] et [137]). Donc :

> **« Un individu donné n'est que partiellement déterminé par son hérédité génétique à sa naissance. »**

Si un savant surdoué mais laid épouse une reine de beauté sotte il n'est pas certain que leur progéniture ait l'intelligence du père et la beauté de la mère. Cela peut arriver, mais il peut aussi arriver qu'un de leurs enfants ait la beauté du père et l'intelligence de la mère, en plus de caractères hérités de grands-parents…

Evolution du programme génétique

Au fur et à mesure du développement de l'individu (*ontogenèse*) et des circonstances de sa vie, et au fur et à mesure qu'on passe d'une génération à sa descendance, certains mécanismes de création de protéines et de création cellulaire peuvent se modifier : une partie du programme génétique est capable de se modifier et de s'adapter par autoprogrammation (en fait par mécanismes d'expression/inhibition relevant de l'épigénétique).

> *Ontogenèse*
> Ensemble des processus qui conduisent de la cellule œuf d'un être vivant à l'adulte reproducteur.
>
> *Epigenèse*
> Théorie selon laquelle l'embryon d'un être vivant se développe par multiplication et différenciation cellulaire progressive, et non à partir d'éléments préformés dans l'œuf [316].

Cette adaptation par autoprogrammation génétique a été mise en évidence par les recherches publiées dans [138], dont voici une citation :

"Il ne faut que 15 générations pour que le génome de certaines mouches évolue dans un sens qui leur permettre d'apprendre plus vite. Au début de l'expérience, il faut beaucoup d'heures aux mouches pour apprendre la différence entre deux types d'aliments dont l'odeur est appétissante, mais dont l'un est nocif. Les mouches dont le génome s'est adapté à un apprentissage rapide n'ont besoin que de moins d'une heure."

Les mutations
Autre exemple d'adaptation génétique, voici des extraits de [1r], article par Roger Durand, professeur de biochimie à l'université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand) :

"Vers les années 1946-1948, Boris Ephrussi observait qu'une culture de levure diploïde ou haploïde donne après repiquage, dans les quelques jours qui suivent, une colonie identique aux cellules mères sauf, dans quelques cas, 1 à 2 % de cellules plus

petites. Les mutants « petite colonie » ne donnent que des petites colonies. La mutation est irréversible. Le traitement des cellules de la souche sauvage par l'acriflavine fait passer le taux de mutation de 1-2 % à 100 %. Ces mutants poussent lentement car ils ne peuvent respirer, leur métabolisme est uniquement fermentaire, ils ont perdu la capacité de synthétiser un certain nombre d'enzymes respiratoires."

"Ephrussi devait arriver à la conclusion que la souche sauvage et les mutants « petites colonies » diffèrent par l'absence, dans le dernier cas, d'unités cytoplasmiques requises génétiquement pour la synthèse de certains enzymes respiratoires."

"En 1968, on devait démontrer que la mutation « petite colonie » est due à une altération importante de l'ADN mitochondrial. Cette molécule contient 75 000 paires de bases… la mutation « petite colonie » correspondrait à une excision et amplification de fragments d'ADN terminés par des séquences CCGG, GGCC."

Ces modifications, appelées mutations, sont parfois dues à des accidents (solutions de faible probabilité de l'équation de Schrödinger décrivant la formation de la molécule). D'autres sont dues à des agressions de l'environnement, comme l'absorption de substances chimiques nocives ou l'action de rayonnements ionisants (rayons X ou ultraviolets, par exemple). Souvent, les mutations sont inopérantes et leurs conséquences néfastes sont annulées par des mécanismes réparateurs de l'ADN comme les enzymes du « système S.O.S. » [139]. D'autres mutations sont nécessaires à l'adaptation de l'individu à son environnement, comme celles qui produisent des anticorps de résistance à une infection.

Autres exemples de mutations :

- L'adaptation de nombreux insectes aux pesticides, la résistance croissante de nombreuses bactéries aux antibiotiques, et les mutations de virus.
- Les habitants des pays asiatiques qui ont depuis des siècles une alimentation plus riche en amidon que celle des Européens, ont dans leur génome des copies supplémentaires d'un gène facilitant la digestion de l'amidon, alors que les Européens n'ont pas ces copies : le génome s'adapte à des habitudes de vie et ces adaptations se transmettent entre générations.

9.6 Evolution d'une population

Une population *évolue* quand des individus porteurs de certains caractères (exemples : la taille, le poids) ont une descendance plus nombreuse que les autres individus ; ces caractères deviennent alors plus fréquents dans les générations suivantes.

Lorsque les caractères génétiques d'une population se modifient avec le temps, on dit que cette population subit une *évolution biologique*. Lorsqu'une telle évolution correspond à une amélioration des capacités de survie ou de reproduction, on parle *d'adaptation* de cette population à son environnement. La sélection naturelle (étudiée par Darwin [140]) favorise la survie et la multiplication des populations les mieux adaptées et défavorise les autres.

Lorsque l'évolution d'une espèce vivante *A* produit des individus suffisamment différents de ceux de cette espèce, mais suffisamment semblables entre eux pour constituer une espèce *B*, on dit qu'il y a *spéciation*. Les individus de l'espèce *B* ont de nombreux points communs avec leurs ancêtres de l'espèce *A*. La biodiversité résulte de nombreuses spéciations successives.

Remarque : il est faux d'affirmer que « l'homme descend du singe » : la vérité est qu'ils ont un ancêtre commun.

Evolution due à une modification de l'expression de gènes

Sources : [316], [317]

L'article [141] décrit les résultats de recherches récentes qui montrent que l'évolution darwinienne par mutations génétiques, qui agit à long terme (sur des milliers d'années), *est accompagnée d'une évolution due à une mutation de l'expression de gènes*, c'est-à-dire de la manière dont la machinerie cellulaire interprète le programme des gènes pour fabriquer des protéines. Cette mutation de l'expression provient parfois d'un processus très simple affectant un seul gène, et produisant un résultat dès la génération suivante, voire au bout de quelques mois ; parfois la mutation concerne un ensemble de gènes ; parfois même elle agit immédiatement [142].

Le compte-rendu de recherches [143] confirme qu'il suffit parfois qu'un simple radical méthyle (CH_3 : 4 atomes seulement) se lie à un gène pour inhiber l'expression de celui-ci, produisant alors des effets considérables sur l'organisme. Il existe ainsi plusieurs types de « commutateurs chimiques » qui déclenchent ou inhibent l'expression d'un gène, avec des effets importants sur la plupart des affections non infectieuses (cancer, obésité, désordres neurologiques, etc.) Ces déclenchements ou inhibitions peuvent avoir un effet pendant toute la vie de l'organisme ou seulement pendant un temps. Ce sont des effets « tout-ou-rien », parfaitement déterministes et analogues aux effets de commutateurs logiciels sur des programmes informatiques et de l'action d'une loi d'interruption sur une loi d'évolution ou une loi de transition d'état.

Le développement d'un organisme par ontogenèse est déterminé par une hiérarchie de gènes, dont chaque niveau commande le niveau inférieur. Cette hiérarchie favorise l'évolution de certaines formes d'organes et en interdit d'autres. Une hiérarchie de gènes donnée est le plus souvent héréditaire, conduisant à ce qu'à partir de la génération suivante tous les descendants aient la même hiérarchie, commandant la même expression des gènes.

Exemple 1
Les gènes de la famille PAX6 déterminent le développement des yeux dans des êtres aussi différents que l'homme et la mouche.

Exemple 2
Aux îles Galápagos, tous les fringillidés (oiseaux de la famille des pinsons, bouvreuils et chardonnerets) descendent d'un même ancêtre venu du continent. Mais ils sont très différents des fringillidés continentaux, par la forme et la taille de leur bec (adapté aux nourritures disponibles dans ces îles), ainsi que par la taille générale de certains oiseaux, nettement plus importante et procurant plus de robustesse, et par d'autres caractéristiques témoignant d'une adaptation. Extrait traduit :

"En 30 ans, la mesure annuelle des fringillidés a montré que les tailles du bec et du corps ont toutes deux évolué de manière significative. Mais elles n'ont pas varié d'une manière continue et progressive ; la sélection naturelle a tâtonné, changeant souvent de sens d'évolution d'une année sur l'autre."

Les chercheurs ont découvert que toutes ces évolutions s'expliquaient par une expression plus importante du gène BMP4, qui produit une quantité de protéine (appelée aussi BMP4) proportionnelle à l'expression du gène. En augmentant

artificiellement la production de cette protéine dans des embryons de poulets, ils obtinrent des poulets plus grands avec des becs nettement plus forts, ce qui confirmait que c'est bien le BMP4 qui est à l'origine de ces évolutions rapides.

La découverte de l'importance de l'expression des gènes dans l'évolution, et le fait qu'une modification d'expression (parfois d'un seul gène) peut déterminer une évolution à très court terme, constituent *un développement récent fondamental de la théorie de l'évolution*, qui ne considérait jusqu'à présent que la mutation du génome, avec ses effets à long terme.

Nous savons aujourd'hui que *de nouvelles espèces d'êtres vivants peuvent apparaître à la suite d'une évolution de l'expression de gènes existants, non mutés*.

Des scientifiques ont découvert que les gènes nécessaires à l'apparition des pattes et des doigts, indispensables pour qu'un animal aquatique puisse sortir de l'eau et se déplacer sur la terre ferme, existaient depuis longtemps dans de très anciens poissons (les *Tiktaalik*) lorsqu'une évolution dans leur expression a permis la croissance de ces nouveaux types d'organes et la sortie de l'eau des nouveaux animaux, les tétrapodes.



Tiktaalik, poisson à pattes © Microsoft Bing Creative Commons

Nous savons aussi qu'une habitude de vie, un changement important de mode de vie ou un entraînement intensif conduisent à une adaptation de l'organisme par modification de l'expression de gènes chez l'individu concerné. Cette modification a des conséquences comme :

- L'adaptation de certains neurones, qui peuvent par exemple se multiplier et multiplier leurs synapses pour adapter l'organisme à une pratique fréquente (pianiste qui s'exerce 8 heures par jour, athlète qui s'entraîne fréquemment, etc.)
- L'adaptation d'organes (muscles, os, etc.).

9.7 Conclusions sur le déterminisme génétique

Le déterminisme existe bien dans le domaine du vivant sous la conduite du programme génétique. Certains mécanismes déterministes assurent la vie des cellules, d'autres la réplication héréditaire, d'autres la résistance aux agressions de l'environnement,

d'autres encore l'adaptation à des conditions de vie qui changent. Le programme génétique est auto-adaptatif dans certaines limites, cette autoadaptation étant une caractéristique du déterminisme dans le cas des êtres vivants.

Voir aussi les universaux, à l'origine d'une part importante du déterminisme humain dans le paragraphe *Les universaux, part importante de l'inné humain*.

Il y a donc chez les êtres vivants un *déterminisme génétique* qui contrôle toutes les fonctions vitales. Le code génétique, reçu à la naissance et interprété pour générer les protéines des fonctions vitales, contient aussi l'information de structuration du cerveau, dont la conscience interprétera l'état de ses neurones dans toutes les fonctions psychiques. Le code génétique contient donc toute l'information du caractère humain : c'est un programme écrit avec les 4 lettres *A, C, G* et *T* ; tout l'héritage humain transmis entre générations peut donc être écrit sous forme de programme, sa complexité tenant dans 3 milliards de paires de bases.

> **« Chez les êtres vivants c'est un déterminisme génétique qui contrôle toutes les fonctions vitales. »**

Le reste du caractère humain, notamment son besoin de vie sociale et les aptitudes correspondantes, provient de ce que chaque homme apprend depuis la naissance, qui est transmis entre générations par la culture et engendre un *déterminisme culturel*.

> **« Au-dessus du niveau du déterminisme génétique il y a un déterminisme culturel acquis depuis la naissance. »**

L'objection idéaliste au postulat « La matière précède la vie » et sa réfutation

Certains idéalistes refusent de croire que la matière biologique (cellules avec leur structure - quelle qu'elle soit - et leurs processus vitaux) peut à elle seule engendrer et entretenir la vie sans intervention transcendante (divine ou autre, mais en tout cas échappant au déterminisme naturel). Ils pensent qu'il y a une *essence*, un *principe vital*, une sorte de *« cahier des charges »* immatériel, non déterministe et résultant d'une finalité qui préexiste à l'être vivant et en définit les caractéristiques.

La raison de leur refus est que le modèle matérialiste traditionnel, qui fait de la vie une conséquence de la matière, leur paraît incapable de rendre compte de la richesse, de la beauté et de la liberté qu'ils associent à l'essence de la vie.
Voir *De la vraie nature du matérialisme et de la séduction légitime qu'il exerce*.

Comment la matière peut avoir engendré la vie
Nous savons aujourd'hui que l'explication correcte *comprend des algorithmes en plus de la matière biologique dans laquelle leur logiciel exécute son code génétique*, et que c'est ce logiciel à base de code inscrit dans l'ADN (c'est-à-dire cette information) qui détermine toutes les manifestations de la vie :

- Echanges avec l'extérieur de nourriture, de déchets, de chaleur, d'énergie mécanique et d'informations sous forme de perceptions et verbalisations ;
- Réplication et réparation de code génétique endommagé ;
- Différenciation cellulaire permettant la création de cellules spécialisées à partir de cellules souches (épigenèse) ;
- Adaptation aux évolutions et agressions de l'environnement, etc.

L'essence de l'homme
C'est ce logiciel - les données et la logique du code génétique - qui constitue précisément l'essence de l'homme [57]. Une des raisons qui font que les philosophes matérialistes n'arrivent pas à convaincre les idéalistes est que, dans leur modèle du vivant, ils oublient de citer ce niveau logiciel entre le niveau de la matière biologique et celui des fonctions nobles comme l'esprit ; cet oubli leur interdit d'expliquer la richesse, la complexité et l'imprévisibilité du vivant. Nous savons aujourd'hui que les fonctions psychiques comme la conscience et la conscience de soi sont correctement décrites par des mécanismes de logiciel (voir *Conscience de*). De leur côté, les idéalistes, pour qui l'essence de l'homme est spirituelle – pas logicielle - n'acceptent pas de réduire l'homme à ses cellules, objets purement matériels, même pilotées par un programme génétique.

Mécanismes psychiques non algorithmiques ou imprévisibles
Lire *Les 3 catégories de circonstances qui déterminent la valeur dominante*.

> **« La raison n'a aucune influence sur les décisions humaines, ce n'est qu'une faculté au service des désirs et pulsions d'une personne. »**
>
> **« L'homme cherche souvent une bonne raison de faire ce qu'il a envie, ce n'est pas la raison seule qui lui dicte ses décisions. »**

9.8 Mécanismes psychiques algorithmiques

Un mécanisme psychique est qualifié d'*algorithmique* ou de *calculable* s'il peut être simulé par un ordinateur. C'est le cas, par exemple, du calcul mental arithmétique, et aussi du raisonnement déductif pur, simulable par calcul des propositions ou des prédicats (qu'on enseigne en Logique). Mais il existe dans le psychisme [88] :

- Des nombres et des problèmes non calculables : voir dans [0] *Nombres réels et problèmes non calculables* ;
- Des mécanismes non algorithmiques, parfois subconscients, tels que :
  - Retrouver un souvenir dans sa mémoire ;
  - L'intuition ;
  - Les affects ;
  - La reconnaissance spontanée d'images, de sons, de symboles, de structures ou de procédures ;
  - Les associations d'idées, effectuées consciemment ou non, permettant des raisonnements par analogie, des intuitions et l'apparition inexplicable de pensées, de certitudes ou d'affects ;
  - Les représentations de réalités telles que des images ou des procédures, et les représentations d'abstractions.

Au plus bas niveau, ces mécanismes psychiques sont déterministes, car comprenant exclusivement des mécanismes neuronaux de biologie moléculaire sous-jacents, qui sont déterministes. Mais *en pratique* ils peuvent être impossibles à décrire par un algorithme parce qu'on n'en connaît pas assez les processus (notamment ceux qui sont subconscients), et parce que l'effort de rédaction de l'algorithme serait démesuré par rapport à son intérêt. Nous avons vu dans *Le déterminisme ne garantit pas la prédictibilité* que le caractère structurellement déterministe d'un processus n'entraînait pas nécessairement la prédictibilité de son résultat.

Ainsi, à partir des mêmes souvenirs d'une personne, un rapprochement d'idées, une intuition ou une certitude peuvent naître de son état du moment : santé, sensation de faim ou soif, affect récent, etc. L'instant d'avant ou l'instant d'après, dans un contexte un peu différent, les pensées seraient autres.

Nous savons aussi que l'inconscient entretient constamment des pensées qui échappent à tout contrôle de la conscience et à toute origine rationnelle.

10 Annexe

10.1 Lois de Newton – Equations de Maxwell

L'univers de Newton

Newton concevait l'Univers comme de la matière existant dans un continuum spatial et un continuum temporel, mais sans position privilégiée pour la Terre : contrairement au modèle des Anciens, la Terre n'était plus le centre du monde et aucun repère d'espace et de temps n'était privilégié ; il n'y avait plus de distinction entre le Ciel et la Terre, plus de sphère parfaite, éternelle et immuable. Les lois physiques (limitées aux lois de la *Mécanique classique*, à l'époque) étaient les mêmes dans tout l'Univers : les mêmes lois d'attraction régissaient le système Terre-Soleil et la chute des corps sur la Terre ; les lois universelles du mouvement expliquaient la chute des pommes comme les orbites planétaires. Ces orbites que Kepler avait mis des années à déterminer par tâtonnements, Newton en redémontrait les équations en une heure.

Les 4 lois de Newton

Les lois de Newton, fondements de la *Mécanique classique* qui théorise les forces et les mouvements d'objets qui ont une masse, sont *déterministes* : elles permettent la prévision et la prédiction des mouvements des systèmes macroscopiques connaissant des conditions initiales. Elles sont aussi universelles : les mêmes partout, pour tous les corps (terrestres ou célestes), dans le passé, le présent et l'avenir. Ce sont donc des lois relevant du Déterminisme restreint.

Mais de nos jours les lois de Newton ne sont plus que des approximations, valables seulement à l'échelle macroscopique et à vitesse réduite :

- Ces lois ne s'appliquent pas telles quelles à l'échelle atomique, pour laquelle il y a la *Mécanique quantique* (qui relève du Déterminisme statistique) ;
- Elles ne s'appliquent que pour les vitesses négligeables par rapport à la vitesse de la lumière. Pour les vitesses plus élevées, il y a la *Relativité restreinte* en l'absence de champ de gravitation, et la *Relativité générale* en présence d'un tel champ.

Les trois lois du mouvement de Newton s'énoncent comme suit :

1re loi

Un corps immobile ou se déplaçant en ligne droite à vitesse constante restera immobile ou gardera le même vecteur vitesse tant qu'une force n'agit pas sur lui : c'est la loi d'inertie.

Au point de vue déterminisme, un mouvement linéaire uniforme est une situation stable, qui ne changera pas tant qu'une force n'agira pas sur le corps. Et une situation stable étant, à l'échelle macroscopique, sa propre cause et sa propre conséquence est une abstraction humaine qui n'existe pas dans la nature ; l'homme l'a définie pour la simplicité de certains raisonnements.

2e loi

Un corps de masse M animé d'une vitesse de vecteur $\boldsymbol{v}$ et soumis à une force de vecteur $\boldsymbol{F}$ subit une accélération de vecteur $\boldsymbol{a}$ telle que :

$$\boldsymbol{F} = M\boldsymbol{a} = d\boldsymbol{p}/dt$$

où on a appelé :

- ***v*** = *d**r**/dt* la dérivée du vecteur position ***r*** par rapport au temps *t* ;
- ***p*** = *M**v*** le vecteur *quantité de mouvement*, et *d**p**/dt* sa dérivée par rapport au temps *t* ;
- ***a*** = d^2***r***$/dt^2$ le vecteur accélération, dérivée de *d**r**/dt* par rapport au temps *t* ;
- (C'est la loi de proportionnalité de la dérivée de la quantité de mouvement à la force, valable à tout instant *t*).

3e loi
Quand deux corps interagissent, la force de vecteur $\boldsymbol{F_{12}}$ exercée par le premier sur le second est l'opposé de celle du second sur le premier, $\boldsymbol{F_{21}}$ » :

$$\boldsymbol{F_{12}} = -\boldsymbol{F_{21}}$$

(C'est la loi d'égalité de l'action et de la réaction, valable à tout instant *t*).

Loi de gravitation universelle (Loi d'attraction, et sur Terre : Loi de la chute des corps)
Deux points matériels de masses *M* et *M'* distants de *d* s'attirent avec une force *F* donnée par :

$$\boldsymbol{F = G\frac{MM'}{d^2}}$$

où G est la constate universelle de gravitation, G = 6.67 .10^{-11} Nm^2/kg^2.

Constante universelle
La valeur de *G* est la même dans tout l'Univers, pour tous les objets quelle que soit la matière dont est faite leur masse, et quelle que soit l'importance de cette masse.

Classification des lois de Newton en tant que lois d'évolution ou lois d'interruption

- La 2ème loi et la loi de gravitation sont des lois d'évolution, car elles décrivent des forces susceptibles de causer des accélérations.
- La 1ère loi et la 3ème loi sont des lois d'interruption, car elles décrivent des conditions sources de contraintes.

Equations de Maxwell
Les quatre équations de Maxwell décrivent avec précision l'ensemble des phénomènes électromagnétiques à l'échelle macroscopique. Publiées par James Clerk Maxwell en 1864, ces équations fondamentales constituent une description complète de la production et de l'interaction des champs électrique et magnétique.

10.2 Axiomatique et Système logique

Définition
Une axiomatique est une organisation formelle et syntaxique (un système logique) d'un ensemble d'énoncés en vue de raisonnements déductifs.

Exemple : Axiomatique de la géométrie d'Euclide
Source : les *Eléments d'Euclide* (IVe au IIIe siècle avant J.-C.) [36]

Les 5 premiers axiomes à la base de la géométrie euclidienne sont :

1. Par deux points on peut faire passer une droite et une seule ;
2. Un segment de droite peut être prolongé indéfiniment ;
3. On peut construire un cercle en donnant son centre et son rayon ;
4. Tous les angles droits sont égaux ;
5. Par un point extérieur à une droite on peut faire passer une droite parallèle à elle et une seule.

L'abandon ou la modification du 5ème axiome a permis de définir d'autres géométries que la géométrie euclidienne, qui a une courbure d'espace nulle :

- La géométrie hyperbolique (à courbure d'espace négative) ;
- La géométrie elliptique (à courbure d'espace positive) ;
- La géométrie riemannienne (à courbure variant d'un point à un autre) utilisée par Einstein en 1915 dans la Relativité générale (voir [0] : 3-sphère)

Exemple de postulat extrait du Livre premier des *Eléments d'Euclide :*
« Si une droite, tombant sur deux droites, fait [la somme des] angles intérieurs du même côté plus petite que deux droits, ces droites, prolongées à l'infini, se rencontreront du côté où cette somme est plus petite que deux droits. »

La géométrie axiomatique d'Euclide constitue une représentation remarquablement précise et complète de l'espace physique habituel, sur laquelle reposent toute la physique classique et l'ensemble des travaux de Newton.

Application d'une axiomatique à la description structurée d'une science

L'axiomatique est une méthode de présentation structurée d'une science par déductions logiques à partir des principes qui la fondent. Le résultat de cette méthode est *une* axiomatique.

Les théorèmes d'une axiomatique n'apportent donc pas de vérité nouvelle : ils sont implicitement contenus dans ses définitions ; ils en sont des conséquences logiques et n'y ajoutent que des présentations nouvelles, des rapprochements nouveaux.

Cohérence (consistance) d'une axiomatique

Une axiomatique est dite *cohérente* (ou *consistante* en franglais) si tout théorème déduit de ses axiomes (et/ou d'autres théorèmes précédemment démontrés) est lui-même non contradictoire et ne contredit aucun autre théorème ou axiome de l'axiomatique.

Gödel a prouvé l'impossibilité de démontrer la cohérence d'une axiomatique en tant que théorème de cette axiomatique, c'est-à-dire sans recourir à des axiomes ou règles de déduction externes à l'axiomatique.

Complétude d'une axiomatique

Une axiomatique est dite *complète* si on peut démontrer que toute proposition logique qu'on y déduit (théorème), ou qu'on y énonce a priori en la formant à partir de ses notions de base conformément à ses règles de syntaxe, est soit vraie soit fausse ; la démonstration éventuelle doit être de longueur finie et ne doit utiliser que des axiomes, théorèmes et règles de déduction de l'axiomatique.

Mais hélas, Gödel a montré que *toute axiomatique définissant un minimum d'arithmétique des nombres entiers permet l'énoncé d'une infinité de propositions indécidables*. Une telle proposition est soit vraie soit fausse, mais il n'existe pas de démonstration basée sur les axiomes de l'axiomatique et appliquant ses règles de déduction permettant de la démontrer.

> **« Dans une axiomatique certaines propositions logiques qui ont un sens sont indécidables : on ne peut ni les démontrer ni les réfuter. »**

10.3 Physique quantique - Mécanique quantique

L'énergie des rayonnements électromagnétiques est quantifiée – Photon

A la fin du XIXe siècle les lois d'évolution de la physique, celles basées sur les lois de Newton comme celles basées sur les équations de Maxwell, étaient continues et s'exprimaient avec des équations différentielles. Mais en cherchant la distribution des intensités d'énergie rayonnée par un corps noir en fonction de la fréquence, Planck s'est aperçu qu'aucune fonction *continue* ne donnait satisfaction.

> *Définition d'un corps noir*
> On appelle *corps noir* un corps qui absorbe toute l'énergie de rayonnement qu'il reçoit, ne réfléchissant rien ; c'est pourquoi il paraît noir. Une surface recouverte d'une couche de noir de fumée est un corps noir à peu près parfait : il conserve 97% du rayonnement électromagnétique reçu.

En 1900 Planck a trouvé une solution mathématique qui convenait parfaitement, mais qu'il ne pouvait s'expliquer ; c'était la *Loi de quantification de l'énergie électromagnétique :*

> **« Une quantité d'énergie électromagnétique de fréquence ν ("nu") est une grandeur discontinue d'énergie multiple d'un minimum proportionnel à ν. »**

Planck a appelé ce minimum *quantum d'énergie*, d'où le nom Physique quantique. Il a trouvé que, pour chaque fréquence rayonnée ν, l'énergie de ce « grain d'énergie » était proportionnelle à cette fréquence, avec un même coefficient de proportionnalité pour toutes les fréquences, coefficient qu'il a appelé *h* : l'énergie du quantum d'une fréquence ν était donc $h\nu$.

Constante de Planck
h est une constante universelle, une des plus importantes de toute la Physique.
Elle a été appelée *constante de Planck* et vaut $h = 6.62618 \cdot 10^{-34}$ joule **.**seconde ; $h\nu$ est appelé *quantum d'action* (une action étant le produit d'une énergie par un temps). Ce quantum d'énergie électromagnétique, ce « grain de lumière », a été ensuite appelé *photon*. L'énergie *E* d'un photon de fréquence ν est donc $E = h\nu$.
C'est la première équation de la Mécanique quantique.

> **« L'énergie rayonnée par une lumière monochromatique de fréquence ν pendant un certain temps est toujours multiple d'un quantum d'énergie $h\nu$. »**

Explication finale d'Einstein sur la dualité des rayonnements électromagnétiques

La solution de Planck, conforme aux constatations expérimentales, était purement mathématique : elle n'expliquait pas la raison physique de la quantification. Mais

Einstein prouva en 1905 que, pour chaque fréquence ν, *c'est le rayonnement électromagnétique lui-même qui est constitué de « grains » d'énergie discrets*, chacun d'énergie $h\nu$: la granularité de l'énergie électromagnétique était donc une réalité, pas un artifice mathématique.

Les très hautes fréquences ne transportent pas d'énergie thermique, ce qui exclut la possibilité paradoxale d'une énergie rayonnée infinie résultant des équations de Maxwell ; ces équations étaient donc remises en cause dans le cas des spectres de rayonnement thermique par la théorie de Planck-Einstein.

Effet photoélectrique
La puissance d'un rayonnement de fréquence ν est proportionnelle au nombre de photons d'énergie $E=h\nu$ par seconde, émis par une source et absorbés par une cible. Le raisonnement d'Einstein était basé sur *l'effet photoélectrique*, découvert en 1887 par Hertz : une surface métallique éclairée éjecte des électrons.

Mais cette éjection ne se produit que si, pour chaque métal, *la fréquence* lumineuse est suffisamment élevée : avec une fréquence trop basse même une forte *intensité* lumineuse n'éjecte pas d'électrons. Or l'énergie d'un photon de fréquence ν étant $E=h\nu$ et la fréquence ν caractérisant *la couleur* de la lumière, c'était donc cette couleur du rayonnement qui comptait, pas son intensité : la réalité de la granularité des ondes électromagnétiques était ainsi démontrée. Un électron n'est éjecté d'un atome d'un métal donné que si celui-ci reçoit une impulsion énergétique suffisante, dépendant du métal : un seul quantum d'énergie $h\nu$ suffit pourvu que ν soit assez grand, une grande quantité d'énergie provenant de photons de fréquence trop faible n'agira pas.

> **« La couleur d’une lumière monochromatique est notre perception de la fréquence de son onde électromagnétique. »**

Ainsi, en 1905, après avoir démontré l'hypothèse atomiste de granularité de la matière en expliquant le mouvement brownien, Einstein a démontré la granularité des ondes électromagnétiques.

L'explication de l'effet photoélectrique valut à Einstein un prix Nobel de physique.

> *Le prix Nobel d'Einstein*
> Einstein n'a pas reçu de prix Nobel en 1921 pour la découverte de la Relativité ("restreinte" en 1905 et "générale" en 1915). La Relativité restreinte a été jugée trop simple pour valoir le prix, et la Relativité générale n'a pas trouvé, en Suède, de physicien capable de la comprendre pendant la première guerre mondiale.

Dualité des rayonnements électromagnétiques

L'explication de l'effet photoélectrique eut une conséquence fondamentale : selon l'expérience, un rayonnement électromagnétique peut être considéré tantôt comme un phénomène *continu* régi par les équations de Maxwell, tantôt comme un phénomène *discontinu* (quantifié) décrit par Planck et Einstein : il a un comportement *dual*.

> **« Un rayonnement électromagnétique a deux comportements possibles : selon l'expérience, il apparaît tantôt continu sous forme d'ondes, tantôt quantifié sous forme de particules. »**
> (Selon l'expérience, un rayonnement électromagnétique peut se comporter tantôt comme une onde continue, tantôt comme un flot discontinu de photons.)

L'extrême petitesse de la constante *h*, donc aussi d'un quantum $h\nu$ quelle que soit la fréquence ν pas trop élevée, explique notre perception d'une variation continue d'une quantité d'énergie lumineuse. A notre échelle, les atomes aussi sont trop petits pour que la matière paraisse discontinue.

Lois de la nature justifiant l'existence d'une physique quantique

Le paragraphe précédent montre que l'énergie électromagnétique est quantifiée, et qu'à l'échelle atomique il y a des phénomènes, comme l'effet photoélectrique, qui n'ont pas d'équivalent à l'échelle macroscopique. Il est donc important d'approfondir la physique de l'échelle atomique et la portée du phénomène de quantification.

Le XXe siècle a été pour les physiciens une époque révolutionnaire, à l'échelle astronomique avec la Relativité, comme à l'échelle atomique avec la Mécanique quantique. Cette dernière a mis en évidence les 8 règles suivantes.

1. A l'échelle macroscopique les lois d'évolution sont continues, mais à l'échelle atomique certaines sont discrètes, nous l'avons vu ci-dessus

Il existe des lois physiques discrètes (=discontinues), comme la loi sur la quantification de l'énergie électromagnétique. Dans une telle loi, une ou plusieurs variables ne peuvent avoir que des valeurs multiples d'un quantum, contrairement par exemple à une durée, dont la valeur peut varier d'une quantité aussi petite que l'on voudra.

« En Physique quantique certaines lois d'évolution sont discrètes. »

2. Equation fondamentale d'évolution d'un système de Schrödinger et ses solutions

La Mécanique quantique, outil incontournable de la Physique quantique, a une équation fondamentale d'évolution des systèmes, l'équation de Schrödinger. A l'échelle atomique, toute évolution dans le temps et l'espace est régie par cette équation différentielle qui peut avoir plusieurs solutions, voire une infinité.

« En Physique quantique les lois d'évolution ont plusieurs solutions, voire une infinité. »

Définition du vecteur d'état d'un objet de physique quantique

Le vecteur d'état d'un objet à l'échelle atomique regroupe toutes les variables descriptives de cet objet susceptibles d'évoluer avec le temps *t*. C'est donc un vecteur fonction de *t*. Les valeurs de ces variables pouvant être quantifiées, l'objet sera dit *quantique*.

Evolution dans le temps et l'espace du vecteur d'état d'un objet quantique

L'équation de Schrödinger décrit l'évolution dans le temps et l'espace du vecteur d'état d'un objet quantique en fonction de l'énergie totale du système. Elle peut avoir plusieurs solutions, voire une infinité, dont l'interprétation est probabiliste.

Combinaison linéaire

On appelle combinaison linéaire de deux variables de même nature *X* et *Y* (par exemple toutes deux nombres réels) une fonction *F* de ces variables calculée en multipliant chacune par un coefficient et en sommant. Avec les coefficients scalaires (nombres réels ou complexes) *a* et *b*, une combinaison linéaire est de la forme $F = aX + bY$.

On peut étendre cette définition à un ensemble de *n* variables $X_1, X_2 \ldots X_n$ et *n* coefficients $a_1, a_2 \ldots a_n$ en définissant $F = a_1X_1 + a_2X_2 + \ldots + a_nX_n$.

On peut étendre encore cette définition en remplaçant les variables *X* par des vecteurs ***V*** à *p* dimensions de composantes V_1, $V_2 \ldots V_p$, toutes définies sur le même ensemble (par exemple le corps des nombres réels ou le corps des nombres complexes), et où chaque composante V_j est une fonction, par exemple une fonction du temps $V_j(t)$.

Par définition, un vecteur ***V*** est dit combinaison linéaire des *k* vecteurs $\boldsymbol{V_1}$, $\boldsymbol{V_2} \ldots \boldsymbol{V_k}$ s'il existe *k* nombres a_1, $a_2 \ldots a_k$ tels que

$$\boldsymbol{V} = \sum_{j=1}^{j=k} a_j \boldsymbol{V}_j$$

Considérons enfin une suite *infinie* de fonctions de plusieurs variables comme $F_1(x; y; z)$, $F_2(x; y; z)$, $F_3(x; y; z) \ldots$ On peut définir une combinaison linéaire *F*, elle-même fonction des mêmes variables, qui est combinaison linéaire à l'infini des fonctions F_1, F_2, $F_3 \ldots$ par l'intermédiaire de coefficients a_1, a_2, $a_3 \ldots$

$$F(x; y; z) = a_1F_1(x; y; z) + a_2F_2(x; y; z) + a_3F_3(x; y; z) \ldots$$

Propriétés de l'équation de Schrödinger
Toute combinaison linéaire de solutions de l'équation de Schrödinger étant aussi une solution, certaines évolutions physiques produisent plusieurs résultats à la fois, voire une infinité. Toutes ces solutions existent en même temps, en l'état particulier de la masse-énergie que nous avons appelé ci-dessus superposition d'états. Une telle superposition est *cohérente*, en ce sens que ses divers états coexistants partagent l'énergie de départ de l'évolution. C'est ainsi que :

- La molécule d'ammoniac NH_3 peut être synthétisée avec deux états à la fois, l'un où l'atome d'azote N est au-dessus du plan des 3 atomes d'hydrogène H et l'autre où il est en dessous.

  « En physique quantique, une transformation de système peut en produire une infinité d'états cohérents qui coexistent en partageant une même énergie. »

- Une particule qui se déplace peut emprunter une infinité de trajectoires à la fois, chacune associée à une certaine densité de probabilité. Ainsi, un électron ou un photon peuvent passer par deux fentes à la fois, produisant des interférences.

  « Une particule qui se déplace entre deux points peut parcourir une infinité de trajectoires à la fois, partant et arrivant en même temps. »

  A un instant donné une particule peut être à une infinité de positions à la fois, là aussi avec leurs densités de probabilité, et avoir une infinité de vitesses… Les notions de position ponctuelle, trajectoire (ligne) et vitesse (vecteur avec une certaine grandeur) sont remplacées en Mécanique quantique par des voisinages aux contours progressifs flous.

  « A un moment donné, une particule peut être à un nombre infini de positions à la fois, avec leurs densités de probabilité. »

  Ainsi, un électron libre en mouvement près d'un objet matériel peut avoir une probabilité non nulle de présence à l'intérieur de cet objet, en dessous de sa surface. Cette propriété est utilisée dans les transistors à effet de champ.

« À un moment donné, une particule en mouvement peut avoir un nombre infini de vitesses à la fois, avec leurs densités de probabilité. »

« En mécanique quantique, les notions de position, de trajectoire et de vitesse exactes sont remplacées par des voisinages aux contours progressifs flous. »

En pratique, les distributions statistiques des positions et des vitesses sont très étroites, la quasi-totalité des valeurs possibles de chacune étant très proches de leur valeur moyenne.

- L'équation de Schrödinger décrit une évolution *unitaire* dans l'espace et le temps, c'est-à-dire à probabilité totale de présence constante et égale à 1.

  « En Mécanique quantique, une évolution conserve la masse-énergie. »
  (Une évolution de système ne peut ni faire apparaître de la masse-énergie totale, ni en faire disparaître. C'est la même règle que celle attribuée à Lavoisier : « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme ».)

  Cette conservation de la masse-énergie s'applique, en Mécanique quantique comme en physique macroscopique, à tout système fermé qui se transforme.

- Pendant une évolution, son résultat (simple ou multiple) n'existe pas : c'est la fin de l'évolution (appelé la décohérence), par exemple lors d'une mesure, qui génère ce résultat.

  C'est ainsi que le chat de Schrödinger n'est pas à la fois mort et vivant tant qu'on n'a pas ouvert sa boîte. Il meurt quand il reçoit le poison (et s'il le reçoit), mais nous ne pouvons savoir ce qu'il est devenu qu'en ouvrant la boîte.

  « En Mécanique quantique, le résultat d'une évolution (valeurs de variables) n'existe pas *pendant* l'évolution, mais seulement *après*. »
  (Pendant l'évolution ces valeurs sont indéfinies.)

A l'échelle macroscopique, l'équation fondamentale d'évolution mécanique est celle de la deuxième loi de Newton, décrivant le déplacement d'un corps de masse *M* dans l'espace et le temps sous l'influence d'une force mécanique *F*. A l'échelle atomique, cette loi est remplacée pour les particules pesantes (autres que les photons) par l'équation de Schrödinger, où la force est celle d'un champ électrique agissant sur une particule pesante chargée électriquement.

« A l'échelle atomique, l'attraction gravitationnelle est négligeable par rapport à l'attraction ou la répulsion électrique. »

3. L'interprétation de résultats d'évolution est nécessairement probabiliste

Les résultats d'évolution de l'équation de Schrödinger constituent nécessairement un ensemble, dont les éléments ont des probabilités (ou des densités de probabilité) prédéterminées d'apparaître si on renouvelle l'expérience qui les mesure un grand nombre de fois. C'est pourquoi nous avons dû introduire un déterminisme particulier pour les régir, le Déterminisme statistique.

« En Mécanique quantique, les états résultant d'une évolution sont un ensemble prédéterminé en superposition cohérente. »
(Chaque état a une certaine probabilité d'apparaître lors de la décohérence.)

4. Complétude de l'équation de Schrödinger - Fonction d'onde

L'équation de Schrödinger est fondamentale : elle décrit toutes les évolutions possibles dans le temps et l'espace d'un système dont on ne prend pas en compte le spin (propriété de particules de "rotation sur elle-même", n'existant qu'à l'échelle atomique). Une telle description est celle de la fonction d'onde calculée par l'équation, fonction d'onde qui est *complète* : elle décrit mathématiquement tout ce qu'on peut savoir de l'état du système (les valeurs de toutes ses variables), ce système étant trop petit pour être vu à l'échelle macroscopique.

> **« En Physique quantique on ne peut tout voir et comprendre qu'avec des formules mathématiques. »**

5. Conservation de l'information d'état d'un système conservatif qui évolue

L'équation de Schrödinger qui décrit l'évolution est déterministe et symétrique par rapport au temps, c'est-à-dire invariable si on change le sens du temps de *t* en *–t*. A partir d'un état d'évolution connu où un système est parvenu, on peut donc en pensée remonter le sens du temps jusqu'à l'origine de cette évolution : *la nature « garde la mémoire » de son évolution*. L'état du système étant complètement décrit par la fonction d'onde calculée par l'équation, on peut (en théorie) retrouver toute valeur passée de cette fonction, notamment toute l'information descriptive initiale du système :

> **« L'évolution d'un système conservatif conserve son information descriptive »**

6. Correspondance entre échelles macroscopiques et atomique

Le caractère fondamental de l'équation de Schrödinger permet d'affirmer que toute évolution de l'échelle macroscopique (nécessairement régie par des lois du groupe des lois de Newton et/ou par des lois du groupe des équations de Maxwell) se ramène à des évolutions à l'échelle atomique régies par l'équation de Schrödinger.

- Les propriétés de symétrie temporelle de celle-ci existent donc aussi à l'échelle macroscopique.
- Il existe des méthodes de conversion d'équations d'évolution de l'échelle macroscopique en équations de l'échelle atomique. On peut donc étudier l'évolution d'un système de l'échelle atomique comme s'il était à l'échelle macroscopique en convertissant ses équations d'évolution.

> **« La nature ignore la notion d'échelle. On peut déduire les équations d'évolution d'un système à l'échelle atomique des équations à l'échelle macroscopique. Il n'y a pas d'incohérence entre les lois d'évolution d'échelles différentes. »**

7. Intrication et non-séparabilité de l'espace

Deux ou plusieurs solutions d'évolution d'un système, générées en même temps et partageant une même énergie, peuvent être *intriquées*. L'intrication est un autre état original de la masse-énergie où le système peut s'étendre dans l'espace à l'infini pendant son évolution, tout en se comportant, du point de vue causalité, comme s'il était concentré en un point de l'espace. Toute action sur une partie du système (par exemple sur un photon d'un ensemble de photons intriqués) agit *en même temps* sur toutes les autres parties, même si elles sont à des kilomètres [96]. Dans ce cas, la vitesse de propagation n'est pas limitée à celle de la lumière, car il n'y a pas de

propagation d'énergie, la totalité du système subissant l’action en même temps. L'espace occupé par le système est alors qualifié de *non séparable*.

> **« A l'échelle atomique, plusieurs particules partageant une même énergie car créées ensemble, peuvent évoluer ensemble décrites par une même fonction d'onde : on les dit *intriquées*. Une action sur l’une d’elles se répercute alors sur les autres en un temps nul, indépendamment de leurs distances. »**

Expérience de pensée ([272-4] page 126)
Considérons une boîte pleine de lumière dont l'intérieur est fait de miroirs tels qu'un photon ne puisse s'en échapper. Cette boîte est posée sur le plateau d'une balance hypersensible capable de mesurer l'énergie (donc la masse équivalente car $E = mc^2$) d'un photon. A un moment donné un petit trou s'ouvre et un photon – un seul – sort de la boîte.

Question : la balance signale-t-elle la sortie du photon, la boîte étant désormais moins lourde ?

Réponse : non, pas tant que le photon n'a pas été absorbé. Tant qu'il existe et se déplace à la vitesse de la lumière son état est corrélé avec la boîte, dont le poids ne change donc pas. Mais dès qu'il est absorbé par quelque chose, après avoir parcouru hors de la boîte 1 cm, 1 m ou 100 km, la boîte a perdu son énergie et la balance le signale.

Cette réponse ne doit pas nous surprendre. Si on considère le système fermé de la boîte initiale, qu’un photon y reste ou en sorte ne change rien à sa masse-énergie. Le principe de conservation de l'énergie de ce système fait donc que sa masse-énergie reste constante même si le photon sort de la boîte. Par contre, lorsque le photon est absorbé par un objet externe au système de la boîte, celui-ci perd évidemment une masse équivalente à l'énergie du photon.

Cette perte n’est pas instantanée, elle se produit lorsque l’information de l'événement absorption est parvenue à la boîte, à la vitesse de la lumière. C’est là une différence entre un système fermé à éléments assemblés et un système intriqué à éléments partageant une même énergie car créés ensemble : dans ce dernier, la destruction de l’un des éléments intriqués est répercutée sur tous les autres instantanément.

8. Contraintes d'incertitude et d'indétermination - Fluctuations quantiques
Principe d'incertitude de Heisenberg : il est impossible de mesurer simultanément (dans une même expérience) les deux valeurs de certains couples de grandeurs d'un système : {position et vitesse selon une direction donnée}, {orientation angulaire et moment cinétique} ou {énergie et durée}.

L'incompatibilité de la détermination simultanée d'une énergie et d'une durée peut être interprétée comme *une instabilité* ou *une indétermination de l'énergie* : deux mesures identiques d'énergie séparées par un intervalle de temps trop bref ne sont pas nécessairement reproductibles. A l'échelle atomique, tout point de l'espace, dans un atome comme entre deux galaxies, a une énergie potentielle instable, sujette à des fluctuations quantiques d'autant plus importantes qu'on les mesure pendant un instant court.

> **« En tout point de l’espace il y a une densité d'énergie potentielle. »**

« La densité d'énergie potentielle en un point est indéterminée : elle est instable, ses variations possibles sont limitées par le Principe d'incertitude de Heisenberg. »

Principe d'incertitude de Heisenberg : compléments

Une des lois les plus importantes de la Mécanique quantique est le *Principe d'incertitude de Heisenberg*, théorème qui limite la précision possible d'une mesure simultanée des variables de certains couples où elles sont dites « conjuguées ».

Mesure simultanée d'une position et d'une quantité de mouvement selon un axe
Ainsi, en désignant respectivement par Δx et Δp les incertitudes sur la position d'une particule en mouvement selon l'axe des x et sur sa quantité de mouvement (produit $p=mv$ de sa masse m par sa vitesse v), le principe d'incertitude impose que le produit $\Delta x.\Delta p$ soit au moins de l'ordre d'une valeur désignée par $\frac{1}{2}\hbar$, où :

- h est la constante de Planck $h = 6.6261 .10^{-34}$ joule .seconde (c'est une des constantes fondamentales de l'Univers) ;
- $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.054589 .10^{-34}$ joule .seconde ($\hbar$ se prononce h-barre).

Cette condition s'écrit :

$$\Delta x \,.\, \Delta p \geq \frac{1}{2}\hbar, \quad \text{où } \frac{1}{2}\hbar = 0.527.\,10^{-34} \text{ joule.seconde}$$

Exemple
Un atome de fer ayant un rayon de 1.26 angström (1Å = 10^{-10} m), supposons que l'imprécision sur la position d'un électron soit du même ordre, soit $\Delta x = 1Å$. L'incertitude sur la quantité de mouvement de l'électron est alors d'au moins

$$\frac{\frac{1}{2}\hbar}{\Delta x} = 0.53 .10^{-24} \text{ kg.m/s.}$$

Puisque la masse au repos de l'électron est $0.9 .10^{-30}$kg, l'incertitude sur sa vitesse est $0.6.10^{6}$ m/s, c'est-à-dire 600 km/s ! Par contre, si l'on accepte une incertitude de 1mm sur la position (incertitude énorme par rapport à la taille d'un atome), l'incertitude sur la vitesse tombe à 6 cm/s.

L'incertitude sur deux mesures simultanées doit être comprise axe par axe. C'est ainsi que la composante selon l'axe Oz de l'impulsion, p_z, peut être mesurée en même temps que la composante selon l'axe Ox de la position, x, sans que la limitation $\Delta x.\Delta p_z \geq ½\hbar$ intervienne.

Conséquence du principe d'incertitude de Heisenberg sur des conditions initiales
La doctrine du déterminisme physique définit l'évolution d'un système à partir de ses conditions initiales et de la loi d'évolution qui s'applique à elles. Et lorsqu'il est impossible d'intégrer une équation différentielle d'évolution, une solution approchée est calculée pas à pas à partir de conditions initiales.

Mais d'après le principe d'incertitude de Heisenberg il est impossible, à propos d'un système, de connaître au même instant avec précision les deux variables de certains couples comme {position + quantité de mouvement - c'est-à-dire position + vitesse}. Alors, comment disposer de conditions initiales acceptables ?

La réponse résulte de la différence entre connaître par constatation expérimentale et définir arbitrairement : le principe d'incertitude de Heisenberg ne peut interdire de définir, il ne s'applique qu'aux grandeurs physiques, notamment aux mesures.

Pourquoi ne connaissions-nous pas déjà le principe d'incertitude de Heisenberg ?
Le principe d'incertitude exprime une forme d'incompatibilité entre précisions des déterminations *simultanées* de la position selon un axe de coordonnées et de la quantité de mouvement (impulsion) selon cet axe. La quantité de mouvement *p=mv* n'est pas la vitesse seule, la masse y intervient tout autant. Si cette masse est minuscule, comme c'est le cas pour les particules de physique atomique, la limitation ≥ est difficile à satisfaire ; mais si la masse est de l'ordre du kilogramme (~10^{30} fois plus élevée que celle d'un électron) elle est satisfaite dans toutes les expériences de la vie courante : voilà pourquoi le principe d'incertitude de Heisenberg ne nous empêche jamais de mesurer simultanément (à l'échelle macroscopique) une masse et une vitesse avec une excellente précision.

Mesure simultanée d'une énergie et d'une durée – Instabilité d'une énergie
La limitation de précision de deux mesures simultanées existe aussi pour un autre couple de variables conjuguées, *l'énergie ΔE* et *la durée Δt* :

$$\Delta E.\Delta t \geq \frac{1}{2}\hbar$$

Cette dernière inégalité peut être interprétée comme *une instabilité ou une indétermination de l'énergie* : pour qu'une particule puisse rester à un certain niveau d'énergie (que ce niveau ne change pas trop, donc que *ΔE* soit assez petit) il faut qu'elle (ou sa mesure) dispose d'un temps suffisant. Des mesures successives d'énergie trop rapprochées dans le temps peuvent produire des résultats trop instables.

Cette condition était importante aux premiers instants de l'Univers pour que certaines synthèses atomiques soient possibles malgré les chocs provenant de photons de très haute énergie, qui pouvaient briser les particules composites créées (par exemple les noyaux atomiques).

Fluctuations quantiques d'énergie dues au principe d'incertitude de Heisenberg

Ce paragraphe est assez technique : pour des explications voir [0]

L'instabilité énergétique due au principe d'incertitude de Heisenberg permet au vide d'être le siège de « *fluctuations quantiques* » d'énergie. Chaque fluctuation peut se matérialiser (spontanément ou en réponse à une excitation reçue : particule ou rayonnement), en créant de la masse-énergie (une particule et une antiparticule de charge électrique opposée) en empruntant une énergie potentielle *ΔE* au vide environnant pendant un temps court de l'ordre de $\frac{\hbar}{\Delta E}$, et en la restituant ensuite.

> **« Partout, le « vide » de l'Univers contient de l'énergie potentielle dont les fluctuations créent des paires éphémères de particules. »**

L'énergie *ΔE* est celle de l'émission d'une paire particule-antiparticule ou d'un nombre entier de photons (ou plus généralement de bosons ou de fermions). Le champ électromagnétique de la paire exerce une force attractive ou répulsive sur tout objet chargé, et lui communique une énergie $h\nu$ pour chaque photon de fréquence ν échangé.

Le regroupement des particules d'une paire est rapide et inévitable dans un espace-temps plat ou à courbure relativiste très faible. Mais au tout début de l'Univers, lorsque l'espace-temps ultra dense avait une forte courbure, et particulièrement pendant la courte et brutale période d'inflation, les particules d'une paire ont pu se trouver séparées trop vite pour s'attirer et disparaître, elles ont pu perdurer. Ce phénomène se poursuit de nos jours lorsqu'un trou noir « s'évapore », malgré une masse qui peut être des millions de fois plus grande que celle du Soleil.

« Un trou noir s'évapore spontanément, et de plus en plus vite quand sa masse décroît. »

La présence d'une telle paire de charges opposées crée une polarisation et une déformation relativiste du vide, donc un champ qui agit sur la charge électrique et/ou la couleur d'une particule.

L'action d'un champ sur une particule *décroît* avec la distance de la particule lorsqu'il s'agit du champ électrique ou gravitationnel. Mais lorsqu'il s'agit du champ de couleur agissant sur un quark, l'action *croît* avec la distance (ce qui est absolument contraire à l'intuition et au déterminisme traditionnel !) : pour séparer les quarks d'une paire on devrait fournir une énergie qui croît avec la distance entre ces quarks, et dès que cette énergie suffit pour séparer les deux quarks elle est absorbée par la création d'une nouvelle paire de quarks, un nouveau quark apparaissant pour se coller à chacun des deux anciens quarks séparés ! Ce phénomène interdit donc aux quarks d'être isolés pendant plus d'une infime fraction de seconde. Voir dans [0] *Confinement*.

L'apparition spontanée de masse-énergie extraite de l'espace environnant est de si courte durée qu'on ne peut pas observer les particules produites, d'où leur qualificatif de *virtuelles*. Elle n'en est pas moins prouvée indirectement par ses effets sur des particules ordinaires.

10.4 Conséquences philosophiques de la Mécanique quantique

- Le phénomène des fluctuations quantiques ne relève donc pas d'une loi d'évolution, mais d'une loi d'interruption régissant la naissance spontanée d'une paire de particules sans cause autre que l'instabilité/indétermination de la densité ponctuelle d'énergie.

  « Exemple de déterminisme sans cause : les fluctuations quantiques. »

  « L'instabilité/indétermination de l'énergie est cause de transitions d'état. »

- C'est l'existence de ces apparitions de particules dans la fraction de seconde qui a suivi le Big Bang qui explique leurs combinaisons en matière qui ont perduré jusqu'à ce jour : sans elles nous n'existerions pas.

  Il se peut même que l'Univers ait été créé par une fluctuation quantique [109].

- Le vide, espace sans matière ni énergie, n'existe nulle part : ni au sein d'un atome, ni dans l'espace intergalactique (qui contient environ 6 protons/m^3).

  Le moindre électron libre, par exemple, est constamment entouré d'un nuage de particules-antiparticules virtuelles, et leur champ électromagnétique affecte ses propriétés de manière perceptible.

La Relativité générale nous apprend que le vide interplanétaire et le vide intergalactique ne sont pas des espaces vides, ce sont des milieux contenant de l'énergie et qui sont déformables.

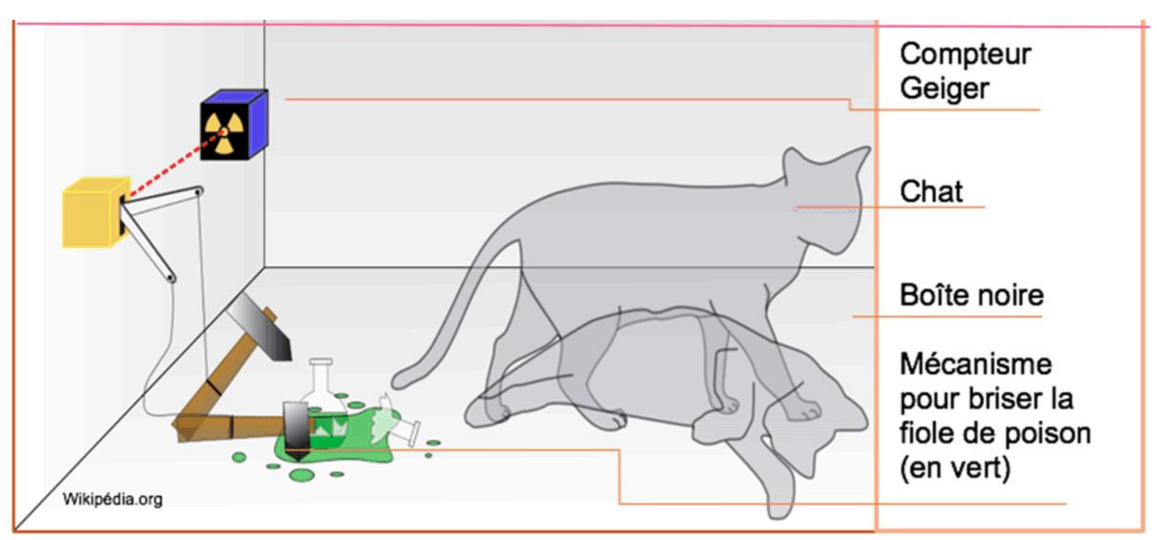
« Le vide, espace sans matière ni énergie, n'existe nulle part. »

Le chat de Schrödinger

(Source : [97])

L'expérience du chat de Schrödinger fut imaginée en 1935 par Erwin Schrödinger, afin de mettre en évidence des lacunes supposées de la description quelque du monde.

L'idée de Schrödinger consiste à placer un chat dans une boite fermée […]. Cette boite est pourvue d'un système destiné à tuer le chat. Ce système est constitué d'un flacon de poison, d'une petite quantité de matière radioactive et d'un compteur Geiger. Lorsque la première désintégration d'un noyau radioactif se produit, le compteur Geiger réagit en déclenchant un mécanisme qui casse le flacon et libère le poison mortel. Ainsi, la désintégration d'un noyau radioactif, un processus microscopique, se traduit par la mort du chat, un événement macroscopique.



Expérience du chat de Schrödinger - © By Dhatfield - Own work, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4279886

La désintégration d'un noyau radioactif est un processus purement quantique, décrit avec une probabilité d'apparition. Il est impossible de prévoir quel noyau se transformera en premier ou quand cette désintégration se produira. La seule chose que nous puissions calculer est la probabilité qu'un certain nombre de noyaux se soient désintégrés après un temps donné. Nous pouvons par exemple choisir un échantillon radioactif de telle façon qu'après cinq minutes il y ait 50% de chances qu'un noyau se soit désintégré et 50% de chances que rien ne se soit produit.

[Phase 1]
Fermons donc la boite et patientons cinq minutes. Puisque la désintégration radioactive s'exprime en termes de probabilités, le sort du chat ne peut être décrit qu'en termes similaires. Après cinq minutes, nous pouvons prédire qu'il y a 50% de

chances que le chat soit mort et 50% de chances qu'il soit vivant, mais nous ne pouvons être certains de son état.

Dans l'interprétation traditionnelle de la Mécanique quantique, le chat n'est alors ni mort, ni vivant : il se trouve dans une superposition de ces deux états. Ce n'est que lorsque nous ouvrons finalement la boite [Phase 2] que l'un des deux états possibles devient [pour nous] la réalité. Le chat est alors soit vivant, soit mort.

L'interprétation traditionnelle de la Mécanique quantique pose donc un problème. Il est possible d'imaginer qu'une particule se trouve dans une superposition d'états, chacun affecté d'une certaine probabilité. Ceci devient en revanche très difficile lorsque l'on considère un objet macroscopique comme le chat en question. L'idée d'un animal ni mort ni vivant, mais dans une superposition de ces états, est plutôt difficile à accepter.

Commentaires sur cette expérience et sa conclusion

- Quel est l'état du chat ?
  - Phase 1 : c'est un état dynamique, traduisant l'évolution : *superposition* d'un état "mort" (probabilité 50%) et d'un état "vivant" (probabilité 50%). Mais cet état ne peut être considéré comme un résultat, car tant que l'expérience dure (la boîte du chat reste fermée) son résultat n'existe pas. *A l'échelle atomique un résultat est toujours créé par une mesure, avant il n'existe pas*.
  - Phase 2 : c'est un état macroscopique, OU mort OU vivant. L'ouverture de la boîte a mis un terme à l'expérience : son résultat peut être annoncé.
- L'idée d'une superposition d'états « chat vivant » + « chat mort » choque notre bon sens. La Mécanique quantique ne prévoit la superposition qu'en tant qu'état virtuel dont on sort par une interaction (comme une mesure) avec l'environnement du système.
- Mais de très nombreuses expériences d'états multiples ont été observées depuis 1935, par exemple [96]. Nous devons donc accepter la réalité, à l'échelle atomique, d'un mode d'existence virtuelle de type états cohérents, état de la matière où le système a conservé les valeurs de variables comme les totaux de masse et de charge électrique qu'il avait avant la génération des particules corrélées.
- La durée de vie d'une superposition d'états est en général extrêmement courte pour un système macroscopique, trop courte pour être mesurée. Pour un système à l'échelle atomique elle est d'autant plus courte que ses interactions avec son environnement macroscopique sont importantes, du fait de sa taille, de l'agitation thermique, du contact avec un instrument de mesure, etc.

  Exemple : dans l'ordinateur quantique Rigetti, la durée d'une superposition d'états à une température de supraconductivité de 1°K est au maximum de 90 µs (90 microsecondes) [98].

Conclusion
L'interprétation des résultats de la Mécanique quantique n'est pas évidente. Il a fallu des années après la publication de l'équation de Schrödinger en 1926 pour la clarifier.

10.5 Principe de correspondance macroscopique ⇔ quantique

> **« Il y a, entre les lois de la physique quantique et les lois de la physique macroscopique qui s'en déduisent, un principe de compatibilité appelé *Principe de correspondance.* »**

Selon ce principe, lorsque le système considéré est assez grand pour que les effets quantiques soient négligeables, les prédictions de la physique quantique doivent être les mêmes que celles de la physique macroscopique pour toutes les variables (appelées « observables ») de la physique quantique qui ont un équivalent limite en physique classique.

> *Observables et valeurs propres*
> Les variables de la physique classique (position, vitesse, énergie, etc.) sont représentées, en Mécanique quantique, par des opérateurs mathématiques non commutatifs appelés observables qui dépendent des dispositifs de l'expérience, d'où leur nom. En tant qu'être mathématique, la valeur d'une observable est une valeur propre, dont l'ensemble forme une base de l'espace des états. (Les définitions de ces termes sont dans [0]).

La continuité de passage entre physique quantique et physique macroscopique est due à l'élimination progressive des imprécisions probabilistes de la physique quantique par l'effet du nombre de particules prises en compte, leurs variations se compensant de mieux en mieux.

La correspondance entre les lois physiques de deux échelles différentes doit toutefois être comprise entre échelles *successives* :

- Entre la Physique macroscopique et la Mécanique quantique ;
- Entre la Mécanique quantique et l'Electrodynamique quantique ;
- Entre l'Electrodynamique quantique et la Chromodynamique quantique.

Ce principe de correspondance est une conséquence :

- De l'uniformité de la nature (voir *Stabilité plutôt qu'universalité*) ;
- Du fait que la nature ignore le concept d'échelle, abstraction humaine utilisée pour représenter les phénomènes, les comprendre et en prévoir et prédire l'évolution.

Il y a aussi des règles mathématiques permettant de passer d'équations de la physique macroscopique à des équations à opérateurs non commutatifs de la Mécanique quantique, puis de là à l'Electrodynamique quantique, etc.

Remarque sur les phénomènes n'apparaissant qu'en physique quantique

L'existence du principe de correspondance n'interdit pas que certains phénomènes n'apparaissent qu'en physique quantique. Cela n'a rien d'étonnant : lorsqu'on regarde un objet au microscope, certains détails n'apparaissent qu'au-delà d'un grossissement minimum ; en deçà, ils existent mais sont négligeables.

10.6 Principe de complémentarité

Le *Principe de correspondance* ci-dessus est complété par le *Principe de complémentarité*, énoncé en 1928 par Niels Bohr. Exemple : le comportement de phénomènes comme la lumière est tantôt corpusculaire tantôt ondulatoire, selon l'expérience ; il n'y a pas de contradiction, il y a une *dualité onde-particule* : la loi

d'évolution qui s'applique dépend de l'expérience en plus de la nature de son objet physique.

Enoncé du Principe de complémentarité

> **« On ne peut observer à la fois un comportement corpusculaire et un comportement ondulatoire, ces deux comportements s'excluant mutuellement et constituant des descriptions complémentaires des phénomènes auxquels ils s'appliquent. »**
> Analogie : il n'existe pas d'expérience permettant de *mesurer avec précision,* à la fois, les composantes selon un même axe de la position et la vitesse d'une particule (Principe d'incertitude de Heisenberg). Mais pour faire des raisonnements et des calculs rien n'empêche de se donner à la fois la position et la vitesse.

Conclusion
La Mécanique quantique est valable même pour des systèmes grands et complexes ; mais son utilisation en tant qu'outil mathématique n'est pratique que pour les systèmes à l'échelle atomique.

10.7 Interprétation métaphysique de Copenhague

A l'échelle atomique l'homme ne peut rien voir, la taille d'un atome étant de l'ordre de l'angström (10^{-10} mètre). Il doit donc se représenter les structures et comportements physiques d'après les formules mathématiques qui les décrivent. Ces représentations sont si étranges, si déroutantes, qu'il a fallu plusieurs années pour comprendre comment les interpréter.

L'interprétation de la Mécanique quantique la plus utilisée aujourd'hui est celle dite « de Copenhague », due à Niels Bohr qui était danois. Bohr et ses collègues pensaient que :

- L'homme ne peut connaître la réalité, il n'a accès qu'aux représentations qu'il s'en fait : c'est la doctrine de Platon (allégorie de la caverne) et de Kant (idéalisme transcendantal). Il ne doit donc pas raisonner sur la réalité, mais seulement sur les phénomènes qui lui sont accessibles. Il doit même accepter que des lois physiques soient multiples, comme les résultats de l'équation de Schrödinger, et ne permettent donc pas de prédire un résultat unique.

  Ainsi, la valeur d'une variable de l'état quantique *n'existe pas* entre deux mesures (circonstances où seule existe l'inaccessible réalité) ; elle n'existe qu'après une mesure qui l'a créée.

  « A l'échelle atomique c'est la mesure qui crée la valeur ; avant elle n'existait pas. »

  On peut même aller plus loin :

  « Les particules n'existent que lorsqu'elles interagissent. »

  Un électron d'atome d'une couche donnée peut être n'importe où sur son orbitale (=orbite), chaque position ayant une densité de probabilité ; même remarque pour un électron libre en mouvement : tant que rien n'interagit avec lui tout se passe comme s'il n'existait pas. On n'est certain de l'existence d'un électron que lorsqu'il interagit avec une autre particule, révélant alors sa position, sa vitesse et son moment cinétique avec les probabilités de l'équation de Schrödinger et aux

imprécisions dues au Principe d'incertitude de Heisenberg près. De même, on n'est certain de l'existence et des caractéristiques d'un photon que lorsqu'il est capturé ou émis.

« A l'échelle atomique toute mesure perturbe les grandeurs mesurées ; elle est irréversible et il faut en tenir compte en concevant les expériences. »

La description humaine des phénomènes et lois de l'échelle atomique est donc la seule que nous ayons, parce que ses mathématiques sont notre seule manière de les « voir ».

- La Mécanique quantique a 6 postulats, et ils ne sont qu'une axiomatique dont les résultats s'avèrent conformes aux mesures. Ils permettent des calculs prédictifs des valeurs probabilistes des variables.

  La fonction d'onde d'un système conservatif contient toute l'information disponible sur lui jusqu'à ce que l'évolution soit interrompue par une décohérence. Cette fonction d'onde étant unitaire, la quantité d'informations est conservée dans l'évolution.

- Conseil de Niels Bohr : il ne faut pas perdre son temps à spéculer sur la signification philosophique de la physique quantique, il faut s'en tenir aux outils de la Mécanique quantique et faire confiance à leurs résultats.

Cette doctrine est aujourd'hui "officielle", en ce sens qu'elle est la plus acceptée. Elle refuse l'interprétation métaphysique des postulats de la Mécanique quantique, considérée comme un simple outil à appliquer sans se poser de questions ontologiques.

10.8 Relativité restreinte

La Théorie de la Relativité a changé les fondements mêmes de la physique, en redéfinissant les notions et propriétés de l'espace, du temps, de la matière, de l'énergie, de la gravitation et même de la causalité, devenue relative à l'observateur. Il est plus simple de citer les seules parties de la physique qui échappent à la Relativité (la Thermodynamique et la Physique statistique) que celles qu'elle impacte !

La Mécanique quantique et la Relativité sont les deux bases de la physique moderne. La première régit l'infiniment petit et constitue le fondement de la physique macroscopique de Newton et Maxwell, qui s'en déduit ; la seconde régit l'extension de la physique macroscopique à l'échelle de l'infiniment grand astronomique.
Mais du point de vue du déterminisme, objet de cet ouvrage, la Relativité de 1915 est régie par le Déterminisme restreint, comme la physique de Newton de 1687 [9]. C'est pourquoi nous ne l'abordons qu'en annexe, en nous contentant d'en citer quelques principes et lois remarquables qui illustrent le déterminisme restreint.

Notion de relativité

Un train roule à vitesse uniforme. Un voyageur à la fenêtre d'un wagon laisse tomber une pierre sur le talus. En négligeant les frottements atmosphériques, par rapport au voyageur, la pierre tombe tout droit et par rapport au talus, elle décrit une parabole. Sa trajectoire est donc relative au système d'axes (appelé *référentiel*) par rapport auquel on la considère. D'où le nom de Relativité. D'où un premier principe de la Relativité :

« Il n'existe pas de trajectoire absolue, une trajectoire ne peut être définie que par rapport à un référentiel. »

Exemple d'application

La loi d'inertie de Newton s'énonce :

« Un corps immobile ou se déplaçant en ligne droite et sans rotation sur lui-même, restera immobile ou gardera le même vecteur vitesse tant que, de l'extérieur, aucune force et aucun couple n'agissent sur lui ».

Considérons un référentiel, supposé fixe car défini par rapport à des étoiles lointaines. Dans ce référentiel, la loi d'inertie peut s'appliquer pour un mouvement par rapport à ces étoiles fixes. Mais dans un référentiel lié à la Terre, ces étoiles fixes décrivent de grands cercles en un jour astronomique : la loi d'inertie ne peut s'appliquer à elles, car leur mouvement circulaire suppose une force centrifuge. Donc :

> **« L'expression de certaines lois physiques dépend du référentiel. »**

Référentiel galiléen

Pour que la loi d'inertie s'applique, il faut donc choisir un référentiel par rapport auquel les directions des étoiles fixes ne tournent pas. On appellera *galiléen* un tel référentiel, du nom de Galilée, un des fondateurs de la Dynamique (partie de la Mécanique qui étudie les relations entre les forces et les mouvements qu'elles produisent).

Principe de relativité restreinte

La loi de Relativité restreinte est une loi déterministe de la physique qu'Einstein a appelée *Principe de relativité restreinte* :

> **« Les phénomènes de la nature sont régis par les mêmes lois dans tous les référentiels galiléens. »**

Une loi particulière est fondamentale en physique :

> **« Dans tous les référentiels galiléens la lumière se propage dans le vide à la même vitesse *c*. »**
> (*c* = 299 792 458 mètres par seconde exactement dans le vide, c'est une constante de l'Univers (à peu près 300 000 km/s).

Exemple d'application : si un observateur qui se déplace parallèlement à un rayon lumineux mesure la vitesse de la lumière du rayon, il trouvera la même valeur *c* = 299 792 458 m/s quelle que soit sa propre vitesse, même si cette vitesse est 99% de la vitesse de la lumière, et quels que soient le sens de son déplacement par rapport à la lumière et sa couleur (fréquence). Aucune vitesse relative ne s'ajoute ou se retranche de la vitesse de la lumière.

> **« La vitesse de la lumière est une constante de l'Univers. »**

Théorie de la Relativité restreinte

La théorie de la Relativité restreinte décrit la manière de concevoir et de calculer les déplacements qui, par rapport à un observateur, se déroulent en ligne droite à vitesse constante *V* parallèlement à l'axe des *x* d'un référentiel. Voici les formules de calcul :

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}}; \quad y'=y; \quad z'=z; \quad t' = \frac{t-\frac{V}{c^2}x}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}}$$

Ces formules décrivent le passage d'un *événement* à la position (*x ; y ; z*) à l'instant *t* dans le référentiel fixe à ce même événement à la position (*x' ; y' ; z'*) à l'instant *t'.*

On constate que :

> **« Les coordonnées spatiales (*x ; y ; z*) et (*x' ; y' ; z'*) dépendent du temps, et le temps dépend de la position considérée. »**
> (C'est pourquoi on parle d'espace-temps à 4 dimensions.)

Lorsque la valeur absolue de la vitesse *V* est très petite par rapport à *c* (ce qu'on note $V \ll c$), comme c'est le cas dans nos vitesses habituelles, les formules sont celles de notre *principe habituel d'additivité des vitesses* :

$$x' = x - Vt\,; \quad t' = t$$

Effets de la Relativité sur les vitesses, les longueurs, les durées, les masses, etc.

1 – « Une vitesse relative est toujours inférieure à c. »

2 – « Les longueurs se contractent »
Une longueur L_F dans le référentiel fixe devient, dans le référentiel en mouvement à la vitesse *V* :

$$L_M = L_F \sqrt{1 - V^2/c^2}$$

La contraction n'affecte que les longueurs (la dimension parallèle au déplacement), la largeur et la hauteur perpendiculaires à ce déplacement étant inchangées. Un observateur fixe voit un cercle en rotation avec une circonférence réduite, bien que son rayon soit inchangé.

3 – « Le temps se dilate avec un coefficient multiplicateur constant »
Une durée τ dans le référentiel fixe devient, dans le référentiel en mouvement à la vitesse *V* :

$$\tau' = \frac{\tau}{\sqrt{1-V^2/c^2}}$$

(une heure du référentiel fixe dure davantage dans le référentiel mobile : $\tau' > \tau$).

> **« Un observateur trouve qu'une horloge qui se déplace par rapport à lui va moins vite. »**

C'est pourquoi une particule en mouvement (exemple : un méson π^+) a une durée de vie moyenne plus longue qu'au repos. Voir aussi *Paradoxe du voyageur de Langevin*.

C'est aussi pourquoi les satellites GPS ont des horloges de haute précision qui retardent par rapport à des horloges terrestres équivalentes : dans les récepteurs GPS il faut donc appliquer par calcul une correction relativiste.

L'orbite des satellites n'est pas une ligne droite, mais la formule de dilatation du temps s'applique toujours, car elle n'exige pas que le référentiel de référence du mouvement soit galiléen.

> **« Un temps commun à différents endroits n'existe pas. »**
>
> **« Il n'y a ni temps commun à tout l'Univers, ni date commune. »**
> On ne peut savoir ce qui se passe *maintenant* sur le Soleil, car la lumière met ~500 s (8min. 20s) à nous parvenir ; on voit ce qui se passait il y a 8min. 20s.

4 – « Equivalence masse-énergie »

> **« Une masse au repos *m* équivaut à une énergie : *E = mc*^{2}. »**

L’énergie et la masse sont deux formes d’une même grandeur physique, la *masse-énergie.*

Dans l'Univers la densité de masse-énergie provient :

- Pour 5% des *masses des corps* (astres, gaz, poussières, etc.) ;
- Pour 27% de la *matière noire*, transparente et n'émettant pas de lumière, qui n'agit sur la matière ordinaire que par attraction gravitationnelle ;
- Pour 68% de *l'énergie du vide* (énergie “noire“), de nature physique inconnue mais due à l'espace lui-même. Son effet est une pression négative, qui accélère la dilatation de l'espace.

L’équation $E=mc^2$ régit les conversions de :

- masse en énergie (exemples : chaleur émise par le soleil au détriment de sa masse, énergie nucléaire convertie en électricité),
- ou d'énergie en masse (exemple : désintégration d'un photon gamma de haute énergie en une paire de particules électron + positron).

5 – « La masse-énergie augmente avec la vitesse »

Une masse au repos *m* a une valeur relativiste m_R à la vitesse V : $m_R = \frac{m}{\sqrt{1-V^2/c^2}}$

La masse augmente donc avec la vitesse relative et tend vers l'infini à l'approche de $V=c$. C'est pourquoi :

« La vitesse d'un objet pesant est toujours inférieure à *c*. »
(Il faudrait fournir une énergie infinie pour qu’il atteigne la vitesse de la lumière.)

« Les conséquences d'un événement astronomique se propagent dans l'espace à la vitesse de la lumière. »
Exemple d'événement : la fusion de deux étoiles en un trou noir (avec un colossal dégagement d'énergie électromagnétique et une émission d'ondes gravitationnelles), peut devenir visible de la Terre des dizaines de milliers d’années après sa survenance.

6 – « Chaque référentiel a son temps propre »

Considérons un train qui roule à vitesse constante et supposons qu'un observateur fixe *sur le talus* voit deux éclairs (événements simultanés) en deux points *A* et *B* de la voie situés à égales distances de part et d'autre de lui.

Si un observateur *dans le train* les voit aussi, à un instant où le train est à mi-chemin entre *A* et *B*, et que le train roule dans le sens de *A* vers *B*, il voit *A* s'éloigner et *B* se rapprocher ; il perçoit donc l'éclair de *B* avant l'éclair de *A*.

Des événements simultanés par rapport à la voie ne le sont donc pas par rapport à un train en marche : un référentiel lié à la voie et un référentiel lié au train ont chacun leur temps propre :

« Une heure ou une durée n'ont de sens que par rapport à un référentiel précis. »
Cette loi est fondamentalement différente de la loi de l'Univers newtonien du déterminisme scientifique, où l'heure et la durée sont les mêmes partout.

7 – « La simultanéité n'existe pas physiquement. »

- Ni à l'échelle de l'Univers, où il n'y a pas de temps universel, absolu :

« La notion d'ordre absolu de deux événements n'a pas de sens. »

- Ni même, dans un référentiel donné, entre deux lieux différents, car ils sont séparés au sens causal par le temps que met la lumière pour aller de l'un à l'autre.

Notre impression erronée de temps et d'espace absolus (postulats fondamentaux de la physique newtonienne et de la philosophie de Kant) vient d'hypothèses de vitesses toutes négligeables par rapport à la vitesse de la lumière *c* et d'espace euclidien (plat, c'est-à-dire sans déformation).

10.9 Relativité générale

Les deux théories de la Relativité d'Einstein

Einstein a publié ses théories de la Relativité en deux étapes :

- 1905 - Relativité restreinte (en anglais *Special Relativity*), à l'âge de 26 ans ;
- 1915 - Relativité générale (en anglais *General Relativity*).

La Relativité restreinte supposait un déplacement relatif par rapport à un observateur à vecteur vitesse constant, donc sans accélération. La Relativité générale lève cette restriction en prenant en compte les accélérations, notamment celle due à la gravitation.

Ecoulement du temps, Relativité et déterminisme

La notion même de déterminisme régissant les évolutions repose sur l'écoulement du temps, sans lequel elle ne se conçoit pas. Or la Relativité restreinte nous apprend que pour deux observateurs en mouvement l'un par rapport à l'autre le temps s'écoule à des vitesses différentes, et la notion de simultanéité n'a plus la signification habituelle.

Plus grave encore, il y a des situations où, pour un observateur situé au point *M*, l'événement *A* précède l'événement *B*, alors que pour un observateur situé en un autre point, *P*, c'est l'événement *B* qui précède l'événement *A*. Lorsque l'observateur en *M* aura connaissance de l'événement *A il ne saura pas encore que B aura lieu*, alors que lorsque l'observateur en *P* saura que *B* a eu lieu *il ne saura pas encore que A aura lieu.*

Dans ces conditions, que deviennent la causalité et le déterminisme ? Ne pourrait-on considérer que la dimension temps joue le même rôle que les trois dimensions d'espace, donc que la certitude des deux événements *A* et *B* était acquise d'avance pour un observateur extérieur à cet espace à 4 dimensions ?

C'est ce qu'Einstein avait conclu, admettant alors le Déterminisme philosophique, qui prétend que la totalité du passé et de l'avenir forme une chaîne de causalité unique *et qu'il n'existe aucun écoulement objectif du temps, mais seulement des écoulements par rapport à des repères*.

> Remarque : Kant et Newton croyaient en un temps unique, universel.
> Ils ne pouvaient admettre l'idée de se placer à l'extérieur de l'espace-temps, pouvoir réservé à Dieu et idée purement spéculative.

En outre, l'irréversibilité prouvée de certains phénomènes comme la croissance de l'entropie impose d'admettre que le temps s'écoule.

De son côté, la Relativité générale montre que lorsqu'un mouvement entre deux points *A* et *B* traverse un champ gravitationnel, la vitesse d'écoulement du temps change par rapport à un mouvement entre les mêmes points ne traversant pas un tel champ, car sa trajectoire est autre. La courbure de l'espace changeant du fait du champ, la lumière s'y propage selon une trajectoire différente et l'unité de longueur en un point change avec le champ de gravitation en ce point. D'innombrables expériences ont montré que la Relativité générale décrit parfaitement l'Univers en affirmant que :

> **« L'Univers n'est pas un espace vide et homogène. C'est un milieu que le champ gravitationnel des étoiles, poussières interstellaires et galaxies déforme. »**
> (C'est cette déformation qui fait que la lumière ne se propage pas en ligne droite au voisinage d'un astre pesant, et que le temps s'y écoule plus lentement.)

John Archibald Wheeler résume l'influence de la masse-énergie sur les champs gravitationnels, et de ceux-ci sur les déplacements en chute libre d'un corps :

> **« La matière dit à l'espace-temps comment se courber,**
> **l'espace-temps dit à la matière comment se déplacer. »**

<u>L'équation d'Einstein</u>

Cette influence réciproque est décrite par l'équation d'Einstein, dont la simplicité apparente cache un système d'équations différentielles reliant courbure et masse-énergie :

$$G^{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T^{\mu\nu}$$

où :

- $G^{\mu\nu}$ est un tenseur (tableau de 4 lignes x 4 colonnes) décrivant la courbure de l'espace-temps en un point ;
- *G* est la constante universelle de gravitation, $G = 6.67 \cdot 10^{-11}$ Nm^2/kg^2
- *c* est la vitesse de la lumière ;
- $T^{\mu\nu}$ est un tenseur décrivant la densité et le flux de masse-énergie en ce point.

Paradoxe du voyageur de Langevin

Considérons deux jumeaux, Pierre et Paul. Pierre reste sur Terre pendant que Paul part (et voyage à une vitesse inférieure à celle de la lumière, bien entendu). Paul décrit une certaine trajectoire qui finit par le ramener au point de départ sur Terre, où Pierre l'attend. Les deux jumeaux constatent alors que Paul, le voyageur, a moins vieilli que Pierre : le temps s'écoulait plus lentement pour Paul que pour Pierre !

10.10 Electrodynamique quantique - Particules virtuelles

La Mécanique quantique est non-relativiste, en ce sens qu'elle suppose que la gravitation n'a pas d'effet sur les masses, que les particules ne peuvent être ni créées ni détruites, et que leurs vitesses restent suffisamment faibles pour que l'espace et le temps ne soient pas relativistes. Pour lever cette hypothèse, on a créé *l'électrodynamique quantique*.

L'électrodynamique quantique fait la synthèse de la Mécanique quantique, de la Relativité restreinte et des équations de Maxwell de l'électrodynamique classique. Cette théorie décrit mathématiquement les interactions des particules chargées

électriquement (électron, proton, quark…) avec un champ électromagnétique et avec d'autres particules chargées.

L'électrodynamique quantique constitue une des vérifications les plus précises des postulats et méthodes mathématiques de la Mécanique quantique. Elle a été vérifiée avec une précision extraordinaire dans de nombreuses expériences, par exemple en fournissant la valeur du moment magnétique d'un électron avec une précision relative de 10^{-8}. Cette précision est celle qu'aurait une mesure de la distance Paris-New York à quelques centimètres près !

Non seulement cette précision est une caractéristique intéressante du Déterminisme général en matière de physique quantique, mais l'électrodynamique quantique met en lumière aussi d'autres aspects de la physique quantique. Ainsi, par exemple, l'interaction entre deux particules chargées se fait par échange de « photons virtuels », chacun représentant un quantum d'énergie. Ces photons sont *virtuels* car il n'existe aucun moyen de les capturer pour les voir. Ils se manifestent en agissant comme des forces quantifiées qui transmettent leur énergie entre deux particules mobiles en interaction, dont le vecteur vitesse change de direction et de grandeur lorsqu'elles émettent ou absorbent un tel photon. Ainsi donc, une force peut agir entre deux particules, par exemple lors d'un choc, en transmettant un quantum d'énergie ou plusieurs, et *cette action est parfaitement déterministe dans le cadre d'un déterminisme général prenant en compte des discontinuités quantifiées*.

Antiparticules

Autre ajout à la Mécanique quantique, l'électrodynamique quantique introduit, pour chaque particule, une *antiparticule* de même masse et même spin, mais avec des propriétés de charge électrique, moment magnétique et saveur opposées : le positron correspond ainsi à l'électron, l'antiproton au proton, etc. Une particule qui rencontre son antiparticule peut s'annihiler avec elle en libérant une énergie égale à la masse disparue, conformément à la Relativité restreinte ($E = mc^2$). Inversement, un photon d'énergie électromagnétique peut parfois se transformer en matière, par exemple en une paire électron-positron. Enfin, un électron et un positron peuvent s'associer en un atome appelé *positronium*, où le positron constitue le « noyau » autour duquel tourne l'électron.

Mais, hélas, l'électrodynamique quantique est une science inachevée. Il y a des cas où elle prédit des valeurs infinies, physiquement inacceptables. Ce problème a été résolu dans des cas particuliers par une méthode appelée *renormalisation*, qui consiste à prendre en compte l'interaction d'une particule chargée avec son propre champ électromagnétique et à utiliser certaines astuces mathématiques. Le problème de fond est que, malgré les succès et la précision de la partie achevée de cette science, il reste des phénomènes inexpliqués sur lesquels les théoriciens travaillent, notamment une théorie quantique de la gravitation.

10.11 Niveaux d'information biologique et déterminisme génétique

On explique de nos jours certains mécanismes vitaux, par exemple chez l'homme, par un modèle qui s'est avéré fécond : les traitements d'information qui leur sont associés. Ce modèle est celui de l'ADN, décrit plus bas.

Au niveau le plus élevé et en première approximation, notre esprit rationnel fonctionne comme un programme dans un ordinateur qui est notre cerveau : penser, c'est traiter de l'information.

> **« Tout processus mental rationnel peut être décrit sous forme de traitement d'information. »**

C'est là une description de première approximation, assez déterministe, déjà évoquée dans *Mécanismes psychiques algorithmiques*.

Remarque : le fonctionnement du programme-esprit dans le cerveau a une certaine robustesse : dans une certaine limite, des neurones peuvent mourir ou perdre des connexions sans que le programme et ses résultats en soient affectés.

Information du logiciel génétique

Le traitement de l'information génétique de l'ADN tient compte de structures moléculaires *complémentaires* : une molécule donnée ne peut interagir qu'avec une molécule dont la structure lui est complémentaire, c'est-à-dire qui peut former des liaisons chimiques avec elle. La structure d'une molécule définit donc avec quelles autres molécules elle peut interagir : *la structure définit la fonction, qui définit les actions* que la molécule peut exécuter. Une hiérarchie de structures et de fonctions apparaît ainsi, de haut en bas :

- Toute cellule contient un noyau (diamètre de l'ordre de 6µm, soit 6 $.10^{-6}$ m) dans lequel on trouve des chromosomes (23 paires chez l'homme), dont la structure porte l'information contrôlant les fonctions biologiques. Un chromosome humain mesure environ 8µm de long pour un diamètre de 0.5µm.

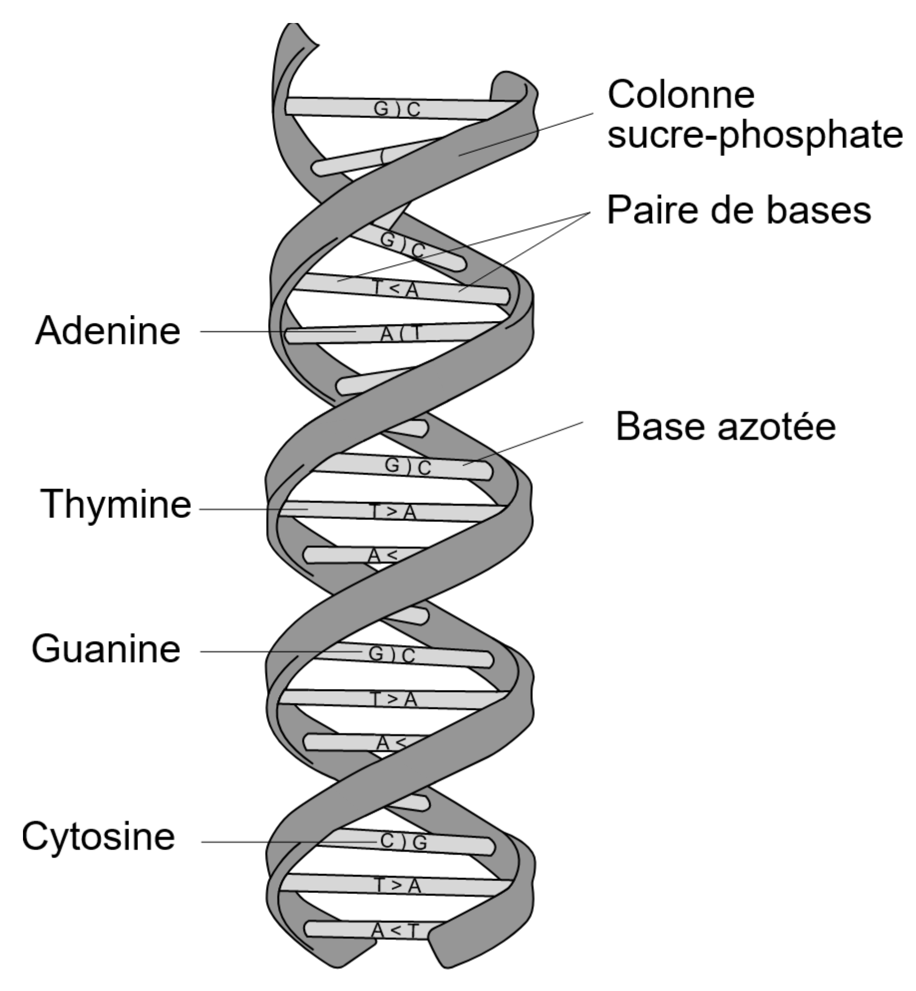
  Dans le volume minuscule du noyau de chaque cellule, la structure ultra-compacte de la molécule d'ADN lui permet de stocker toute l'information décrivant la construction et le fonctionnement du corps humain, notamment de son cerveau. Cette information est identique dans toutes les cellules, bien qu'il y en ait de nombreux types : peau, muscles, sang, etc.

- Un chromosome contient environ la moitié de son poids d'ADN (acide désoxyribonucléique). La molécule d'ADN, géante, a une forme de double hélice comprenant environ 3 milliards de paires de bases chez l'homme. Chacune des hélices est copie exacte de l'autre, redondance qui permet de réparer d'éventuelles "erreurs" lors de la reproduction de cellules.

- La molécule d'ADN contient des séquences de bases (segments) appelés gènes, molécules plus petites dont la structure (l'ordre d'apparition des bases dans un parcours de la séquence) représente l'information nécessaire à :
  - toutes les structures du corps, par exemple celles du cerveau ou de l'œil ;
  - toutes les fonctions biologiques, comme les instructions d'un programme et leur ordre définissent la logique de ce programme. La machinerie de traitement de l'ADN interprète cette logique pour produire les protéines (il y en a environ 100 000 types différents) qui commandent les fonctions biologiques.

  Le langage dans lequel est codée l'information génétique est extrêmement simple : son vocabulaire n'a que 4 « mots » de base, avec lesquels on écrit les instructions des séquences des gènes. Ces mots sont 4 bases azotées appelées

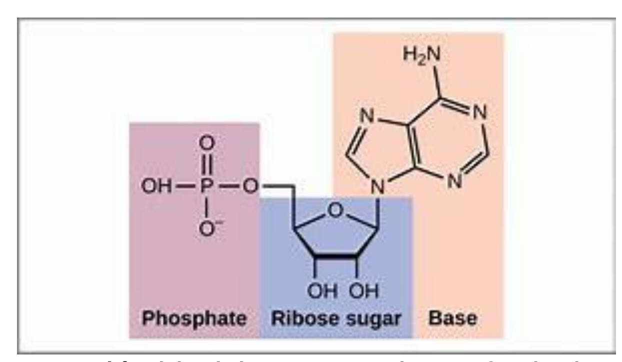
adénine ($C_5N_5H_5$), cytosine ($C_4N_3H_5O$), guanine ($C_5N_5H_5O$) et thymine ($C_5N_2H_6O_2$), représentées par les lettres *A, C, G, T*.



Structure et bases de l'ADN © Wikipedia.org

Chaque brin de la double hélice de l'ADN est une chaîne d'unités élémentaires appelées nucléotides. Un nucléotide est constitué d'un sucre, d'un groupe phosphate et d'une des bases azotées *A, C, G* ou *T*.

Les deux brins de l'ADN sont reliés par des liaisons hydrogène entre une base de l'un des brins et une base complémentaire de l'autre. Une base *A* est toujours associée à une base *T*, et une base *C* est toujours associée à une base *G*.



Nucléotide (Licence © Microsoft Bing)

Une séquence de code génétique peut, par exemple, contenir la chaîne de mots *ATTCGCA*, et une chaîne peut être extrêmement longue, suffisamment pour décrire une logique aussi complexe que l'on voudra.

- Les gènes font construire des protéines par l'ARN (acide ribonucléique) selon les programmes codés dans leur structure ; on peut les considérer comme de minuscules ordinateurs qui pilotent la formation de protéines par la machinerie cellulaire.
- Les protéines sont les constituants des muscles, des poumons, du cœur, des os, etc. Tous les mécanismes de notre corps mettent en jeu des protéines.

La modélisation des mécanismes vitaux non psychiques par des traitements d'information effectués par des programmes est si satisfaisante que ces mécanismes apparaissent aussi déterministes qu'un logiciel informatique. La complexité des processus vitaux et celle d'un logiciel peuvent être considérables sans impacter leur parfait déterminisme, qui n'en dépend pas.

Dans le fonctionnement cellulaire, la biologie moléculaire nous apprend que l'information génétique est transmise dans un sens unique, des séquences ADN vers les protéines, et que ce processus est parfaitement déterministe dans sa manière d'enchaîner les événements à partir de leurs causes.

Les séquences de code génétique ne doivent pas être interprétées comme des suites de phrases ne contenant que des instructions. En effet, en informatique il n'y a pas de distinction nette entre *instructions* (exécuter telle opération) et *données* (nombres, chaînes de caractères, images, etc.), les instructions manipulant des données. Un ordinateur peut travailler en interprétant des données dans un programme ad hoc appelé « interpréteur » ; alors, si les données interprétées changent, la logique du programme qu'elles constituent change et le résultat final aussi.

Exemple d'interpréteur : le logiciel de calcul scientifique MAPLE [145].

Il existe aussi des logiciels *générateurs de programmes*, qui interprètent des données qu'un homme leur fournit pour écrire à sa place un programme dans un langage de haut niveau. Ce langage sera ensuite *traduit* par un logiciel compilateur en langage exécutable par le processeur de l'ordinateur, ou *interprété* par un programme interpréteur spécifique. L'intérêt de cette approche est de simplifier au maximum ce que l'homme doit exprimer pour obtenir un programme adapté à des besoins particuliers, en adaptant cette expression à l'application (analyse statistique de données, par exemple).

Il en va de même pour l'ADN, *que l'on peut considérer aussi comme des données interprétées par la machinerie cellulaire*. C'est pourquoi, par exemple, on peut prélever un gène (donc son code) dans une espèce vivante et l'introduire dans l'ADN d'une autre espèce pour améliorer sa résistance à une maladie, ce qui produit un organisme génétiquement modifié (OGM). En fait, l'ADN et la machinerie cellulaire forment un ensemble matériel + logiciel capable d'adaptation et d'auto-organisation - tant fonctionnelle que structurale - parce qu'il fonctionne tantôt comme un interpréteur, tantôt comme un générateur de programme.

Voir aussi *Evolution due à une modification de l'expression de gènes* et *ADN et ARN*.

Conclusion

Il y a donc chez les êtres vivants un *déterminisme génétique* qui contrôle toutes les fonctions vitales. Le code génétique, reçu à la naissance et interprété pour générer les protéines des fonctions vitales, contient aussi l'information de structuration du cerveau, dont la conscience interprétera l'état de ses neurones dans toutes les fonctions psychiques. Le code génétique contient donc toute l'information du caractère humain : c'est un programme écrit avec les 4 lettres *A, C, G* et *T* ; tout l'héritage humain transmis entre générations peut donc être écrit sous forme de programme, sa complexité tenant dans 3 milliards de paires de bases.

> **« Chez les êtres vivants c'est un *déterminisme génétique* qui contrôle toutes les fonctions vitales. »**

Le reste du caractère humain, notamment son besoin de vie sociale et les aptitudes correspondantes, provient de ce que chaque homme apprend depuis la naissance, qui est transmis entre générations par la culture et engendre un *déterminisme culturel*.

> **« Au-dessus du niveau du déterminisme génétique il y a un déterminisme culturel acquis depuis la naissance. »**

10.12 Principe de déterminabilité d'un concept

Ce principe affirme qu'un concept peut toujours être défini de façon complète, et parfois aussi d'une façon qui le distingue de tous les autres.

Notions préalables

Concept

Un concept est une abstraction représentant une collection nommable d'objets ayant des propriétés communes. Les concepts sont indispensables aux raisonnements logiques.

Exemple : concept de « chien », représentant tous les chiens par des propriétés communes : quadrupède, mammifère descendant du loup, etc. Il est *nommable* : on lui a donné le nom « chien ». L'esprit humain ne peut raisonner que sur des idées nommables, ce qui n'est pas nommable demeurant à l'état de ressenti.

- Le concept est la forme la plus élémentaire de la pensée, à distinguer de formes plus élaborées comme le jugement.
- C'est une idée générale, une classe, un ensemble, par opposition à la représentation, image mentale personnelle. Ex : concept de « mère ».
- Le concept est le produit d'un processus réducteur conscient de l'intelligence comprenant comparaison, réflexion et abstraction ; il s'oppose à l'intuition et ne doit pas être confondu avec l'essence.

Remarque

L'esprit comprend un concept, de base ou non, de manière innée, mais se le représente comme un de ses cas particuliers concrets dans l'espace et le temps : je ne peux me représenter une ligne droite que comme l'image à cet instant d'une ligne droite dessinée ; je ne me représente un nombre entier que comme une propriété de multiplicité d'un ensemble (appelée son *cardinal*) ou un rang (appelé *ordinal*) dans une suite ordonnée d'éléments.

La notion de concept peut s'entendre de deux façons :

- *En compréhension*, avec la liste de toutes les conditions nécessaires (c'est-à-dire les règles d'entendement) que doit satisfaire un objet nommable pour faire partie de la classe générale définie par le concept.
- *En extension*, avec la liste de tous les objets ayant toutes les propriétés ci-dessus (mais aussi peut-être d'autres, considérées comme non significatives).

Voir aussi *Concept de base*.

Prédicat
Qualité, propriété en tant qu'elle est affirmée ou niée d'un sujet. Synonyme : *attribut*.

Principe de non-contradiction (appelé aussi principe de contradiction)
Définition : une contradiction est une opposition entre deux faits ou affirmations incompatibles, ou le résultat logique d'une telle opposition.

Le principe de contradiction (on dit aussi : *de non-contradiction*, on devrait dire : *de contrariété*) postule qu'une chose ne peut pas à la fois être et ne pas être, qu'une proposition ne peut à la fois être vraie et fausse.

Le principe s'énonce : *le contraire du vrai est faux*.
Notation en Logique symbolique : *p* **.** ¬*p* = faux (voir *Table des symboles de la Logique symbolique et de la Théorie des ensembles*).

Un état de système existe ou n'existe pas ; il ne peut exister partiellement.

Un événement a ou n'a pas lieu ; a eu ou n'a pas eu lieu. Rien ne peut changer un événement *X* qui a eu lieu, et seule la nature a pu ou non le provoquer en application d'une loi d'évolution. Toute hypothèse du type « Si l'événement *X* n'avait pas eu lieu… » est pure conjecture.

Principe du tiers exclu, aussi appelé du milieu exclu
Il n'y a que deux cas de valeur logique. Une proposition (affirmation) *p* ne peut être que :

- Vraie, et alors la proposition contraire non-*p* (¬*p*) est fausse ;
- Ou fausse, et alors la proposition contraire non-*p* (¬*p*) est vraie.

Principe d'identité
Ce principe logique affirme l'unité, la cohérence et la stabilité d'un objet qui existe.
Le principe d'identité s'énonce : *« Ce qui est, est ; ce qui n'est pas, n'est pas ».* Une chose (objet, situation, événement) *est* (existe, a lieu ou a eu lieu), ou *n'est pas* (n'existe pas, n'a pas lieu ou n'a pas eu lieu).

L'existence physique a des conditions de possibilité dans le temps et dans l'espace :

- Une certaine permanence (existence pendant un temps non nul) ;
- L'occupation d'un volume d'espace non nul.

Si la chose est, elle est identique à elle-même, pas à autre chose : c'est la seule réalité pour cette chose. On peut toujours *imaginer* un monde différent, ou des conditions dans lesquelles un objet qui existe n'existerait pas, un événement qui n'a pas eu lieu aurait eu lieu, etc., mais ce serait pure imagination.

Principe de déterminabilité d'un concept
Ce principe est une conséquence du principe du milieu exclu ci-dessus.

Dans la *Critique de la raison pure* [B12] page 518, Kant écrit :

"Tout *concept*, vis-à-vis de ce qui n'est pas contenu en lui, est indéterminé et se trouve soumis au *principe de déterminabilité d'un concept* qui veut que, de deux prédicats contradictoirement opposés, un seul puisse lui revenir - principe qui repose lui-même sur le Principe de contradiction et est par conséquent un principe purement logique qui fait abstraction de tout contenu de la connaissance et ne prend en considération que la forme logique."

Traduction : un concept est un ensemble d'informations ; il est indéterminé par rapport à toute information qui n'appartient pas à cet ensemble. Le principe de déterminabilité affirme que dans tout couple de jugements opposés (comme « Ravaillac a tué Henri IV » et « Ravaillac n'a pas tué Henri IV ») un seul s'applique *éventuellement* à un sujet donné, d'après le Principe de non-contradiction.

> S'applique *éventuellement* : le jugement « Ravaillac a tué Henri IV » ne s'applique pas au concept « Charlemagne », qui représente un empereur mort des siècles avant Henri IV ; par rapport à Charlemagne il est indéterminé.

Donc, étant donné un concept *C* et l'ensemble des prédicats possibles *P*, il y a un sous-ensemble *P(C)* de prédicats de *P* qui s'appliquent à *C*, donc déterminent *C*.

Mais cette détermination n'est pas nécessairement unique, il pourrait y avoir d'autres concepts *X, Y*… à qui les mêmes prédicats *P(C)* s'appliquent, peut-être en même temps que des prédicats supplémentaires. Pour déterminer *C* de manière unique il faut donc qu'existe un prédicat *U* de *P(C)* qui ne s'applique qu'au concept *C* ; si un tel prédicat *U* existe on parle pour *C* de *déterminabilité complète*.

Exemple : déterminabilité complète des électrons d'un atome
L'état quantique d'un électron atomique est défini par 4 nombres quantiques :

- Nombre quantique principal, définissant la couche atomique d'énergie ;
- Nombre quantique azimutal, définissant la sous-couche ;
- Nombre quantique magnétique, définissant l'orientation de l'orbitale (trajectoire) dans l'espace ;
- Nombre quantique de spin, définissant le moment cinétique de l'électron.

D'après le Principe d'exclusion de Pauli :

> **« Deux fermions ne peuvent pas être en même temps dans le même état quantique, décrits par les mêmes nombres quantiques. »**

Un électron atomique, étant un fermion, ne peut exister qu'en un seul exemplaire avec 4 valeurs données des nombres quantiques. C'est pourquoi, par exemple, deux électrons ont tendance à s'éviter : sur une même sous-couche d'énergie d'un atome il

y a au maximum deux électrons, et leurs spins sont opposés pour respecter le principe d'exclusion.

10.13 Divers

ADN et ARN

Source : UMass Chan Medical School *What is RNA?* Traduit par l’auteur
https://www.umassmed.edu/rti/biology/what-is-rna/

Commençons par les bases. L’acide désoxyribonucléique (ADN) est une molécule que vous connaissez peut-être déjà; il contient notre code génétique, le plan de la vie. Cette molécule essentielle est à la base du « dogme central de la biologie », c’est-à-dire de la séquence des événements nécessaires au fonctionnement de la vie. L’ADN est une longue molécule à deux brins composée de bases, situées dans le noyau de la cellule. L’ordre de ces bases détermine le plan génétique, de la même manière que l’ordre de lettres de l’alphabet est utilisé pour former les mots. Les « mots » de l’ADN sont longs de trois lettres (ou bases), et ces mots codent spécifiquement pour les gènes, qui, dans le langage de la cellule, est le modèle pour les protéines à fabriquer. L’ADN est également extrêmement stable (étonnamment, l’ADN intact a été isolé à partir de mammouths laineux congelés morts il y a plus de 10 000 ans !), c’est pourquoi du code ADN est utilisé pour transmettre l’information génétique de génération en génération.

Pour « lire » ces instructions, l’ADN à double hélice est décompressé pour extraire les brins individuels et une enzyme les traduit en un message intermédiaire mobile, appelé acide ribonucléique (ARN). Ce message intermédiaire est appelé ARN messager (ARNm), et il porte les instructions pour la fabrication de protéines. Lorsque la cellule n’a plus besoin de fabriquer cette protéine, les instructions de l’ARNm sont détruites. Puisque les instructions d’ADN restent intactes, la cellule peut revenir à l’ADN et faire d’autres copies d’ARN quand elle a besoin de faire plus de protéines.

L’ARNm est ensuite transporté à l’extérieur du noyau, vers l’usine moléculaire responsable de la fabrication des protéines, appelée ribosome. Ici, le ribosome traduit l’ARNm en utilisant un autre mot de trois lettres; toutes les trois paires de bases désignent un bloc de construction spécifique appelé acide aminé (il y en a 20) pour créer une chaîne polypeptidique qui deviendra éventuellement une protéine. Le ribosome assemble une protéine en trois étapes:

- A la première étape, l’ARN de transfert (*ARNt*) apporte l’acide aminé spécifique désigné par le code à trois lettres au ribosome.
- A la deuxième étape, chaque acide aminé est relié séquentiellement par des liaisons peptidiques, formant une chaîne polypeptidique.

  L’ordre de chaque acide aminé est crucial pour la fonctionnalité de la future protéine ; des erreurs dans l’ajout d’un acide aminé peuvent entraîner une maladie.
- A la dernière étape, la chaîne polypeptidique terminée est libérée par le ribosome et est repliée dans son état protéique final. Les protéines sont nécessaires à la structure, au fonctionnement et à la régulation des tissus et des organes du corps; leur fonctionnalité est apparemment infinie. Les cellules humaines fabriquent près

de 100 000 types différents de protéines, chacune avec sa propre suite unique d'ARN messager.

Rappels sur la loi de Gauss (lecture non indispensable)

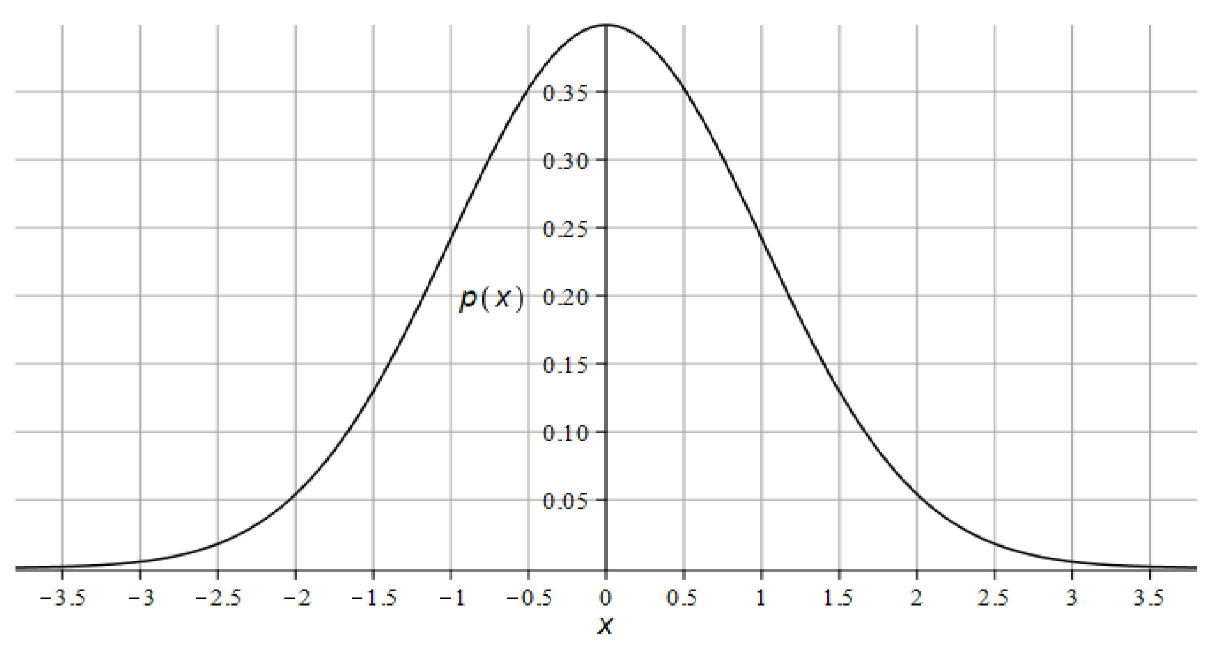
Soit un espace à une dimension, où la position d'un point *Q* est repérée par son abscisse *x*. La fonction de *x* connue sous les noms de "Loi de Gauss" ou "Loi de distribution normale" est :

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$$

Cette fonction représente une *densité de probabilité* au voisinage du point d'abscisse *x* telle que la probabilité de trouver *Q* entre *x* = *a* et *x* = *b* est :

$$p(a \leq x \leq b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_a^b e^{-\frac{x^2}{2}} \, dx$$

Voici la représentation graphique de la densité de probabilité *p(x)* :



Densité de probabilité $p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$. La position moyenne est *x*=0

La probabilité d'une position x_0 dans l'intervalle de largeur *dx* centré sur x_0 est:

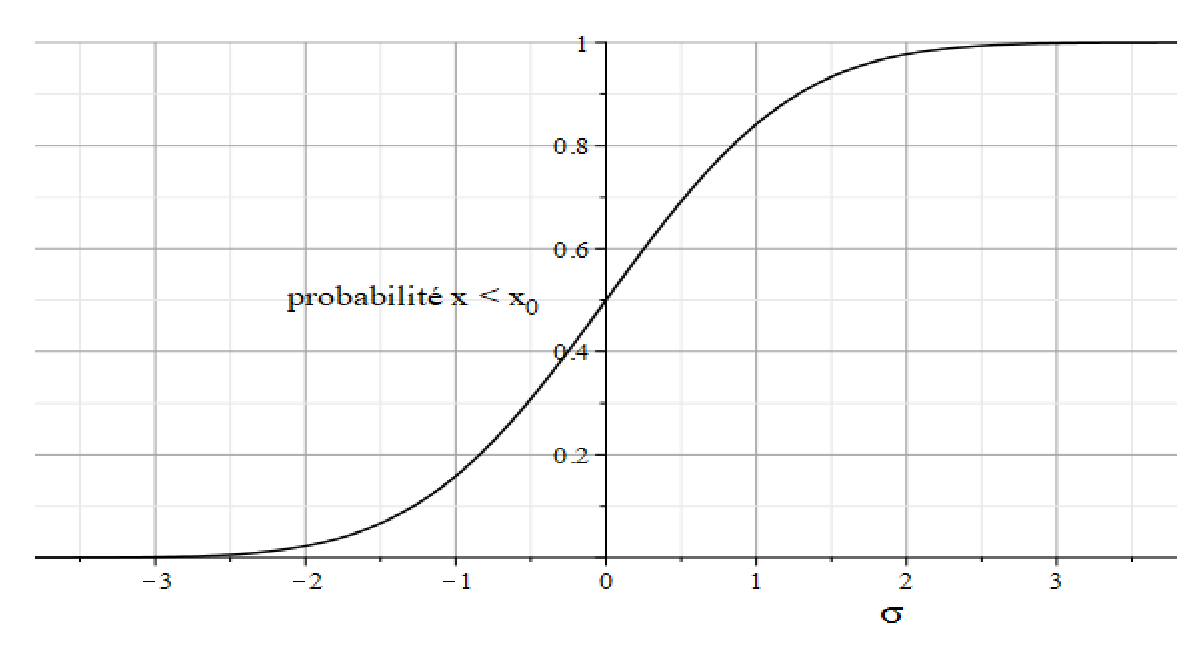
$$prob\left(x_0 - \frac{dx}{2} \leq x \leq x_0 + \frac{dx}{2}\right) = p(x_0)dx$$

La certitude de trouver *x quelque part* (-∞<x<+∞) résulte de l'égalité :

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} \, dx = 1$$

La probabilité de trouver une valeur *x* inférieure à x_0 suit la loi de Gauss :

$$prob(x < x_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x_0} e^{-\frac{t^2}{2}} \, dt$$



Loi de Gauss : probabilité d'une position $x<x_0$ (position moyenne x=0)

Paradoxe d'Achille et de la tortue

Au V[e] siècle avant J.-C. le philosophe grec Zénon « démontrait » que le mouvement n'existe pas objectivement en disant ceci :

> « Le rapide Achille ne peut rattraper une tortue partie avant lui parce que, tandis qu'il parcourt la distance initiale qui le sépare de la tortue, celle-ci avance et franchit un nouvel intervalle qu'Achille doit franchir à son tour, etc. Le nombre d'étapes de rattrapage d'Achille est donc infini, même si chacune ne dure qu'un instant. Il ne peut rattraper la tortue, car pour une infinité d'instants il faut un temps infini. »

Et Zénon, qui ne connaissait pas les notions mathématiques de suite et série convergentes, en déduisait que le mouvement n'existe pas objectivement !

Voici la solution mathématique

Soit D la distance initiale entre Achille et la tortue au départ de la course (instant 0).
Achille court à la vitesse constante V et la tortue à la vitesse constante v.
Achille met un temps $t_0 = \frac{D}{V}$ pour atteindre la position de la tortue à l'instant 0.
Mais pendant le temps $\boldsymbol{t_0}$ la tortue a parcouru une distance $vt_0 = v\frac{D}{V}$.
Achille parcourt cette nouvelle distance en un temps $t_1 = \frac{v\frac{D}{V}}{V} = v\frac{D}{V^2}$.
Pendant le temps $\boldsymbol{t_1}$ la tortue parcourt $\boldsymbol{vt_1}$, qu'Achille parcourt ensuite en un temps $t_2 = \frac{vt_1}{V} = v^2\frac{D}{V^3}$, etc. On voit qu'après le temps initial $\boldsymbol{t_0} = \frac{\boldsymbol{D}}{\boldsymbol{V}}$ Achille met des temps successifs en progression géométrique de raison $\frac{\boldsymbol{v}}{\boldsymbol{V}}$ dont le total est

$T = \frac{D}{V}(1 + \frac{v}{V} + \frac{v^2}{V^2} + \cdots)$.

Posons donc $\boldsymbol{x} = \frac{\boldsymbol{v}}{\boldsymbol{V}}$ et soit la somme $S_n = 1 + x^1 + x^2 + x^3 + \cdots + x^n$ où $\boldsymbol{x} < 1$.

Donc $xS_n - S_n = x^{n+1} - 1$, d'où $S_n = \frac{x^{n+1}-1}{x-1}$.

Lorsque *n* tend vers l'infini x^{n+1} tend vers 0 et S_n tend vers $\frac{1}{1-x}$: la somme S_n n'est pas infinie, elle est *convergente*. Si, par exemple, Achille va 10 fois plus vite que la tortue, S_n tend vers $\frac{1}{1-0.1} = 1.11$ et Achille rattrapera la tortue en un temps $T = 1.11\frac{D}{V}$, puis il la dépassera.

Déclenchement de l'inflation : théories de Grande unification

Source: [0].

Principe de l'inflation
Le phénomène d'inflation est une dilatation (expansion, croissance du rayon) de l'Univers à une vitesse exponentielle pendant une minuscule fraction de seconde (~10^{-32}s), commencée très peu de temps (~10^{-35}s) après le Big Bang.

Détails du déroulement de l'inflation
Environ 10^{-36} seconde après le Big Bang, l'énergie du vide de l'Univers avait dominé fortement les autres formes d'énergie pendant suffisamment longtemps pour que les équations de la Relativité générale (exactement : celles de Friedmann) admettent une solution particulière, instable, où *la dilatation de l'espace se produit à densité de matière-énergie constante* :

> **« Inflation : au fur et à mesure qu'il augmente de volume, l'espace crée de la matière-énergie dans la même proportion, sa densité restant constante »**

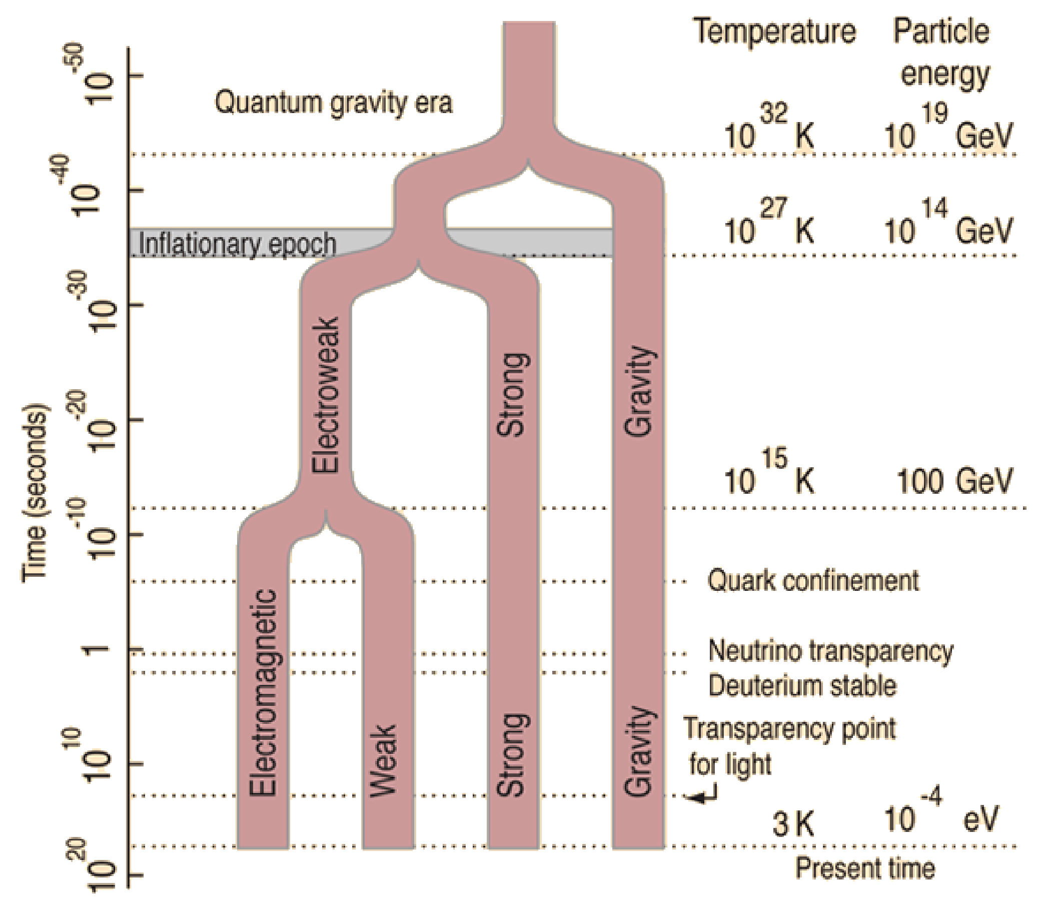
Bien entendu, la matière-énergie créée provient de quelque part, il n'y a pas de création magique à partir de rien. L'expansion résulte d'une pression négative, *qui crée de la matière-énergie en même temps qu'elle dilate l'espace. Cette matière-énergie provient de l'énergie de l'espace « vide » lui-même, qui décroît.*

> Analogie : l'énergie cinétique d'un corps qui tombe provient de la décroissance de l'énergie potentielle du champ de gravitation dont la force le fait tomber.

Pendant la phase d'inflation, l'énergie potentielle de chaque point de l'Univers pouvait devenir aussi négative que nécessaire, pour alimenter l'inflation en baissant. Précisons que « l'énergie du vide » est ici de l'énergie potentielle gravitationnelle, toujours négative.

La baisse de température de l'Univers après le Big Bang
La température de l'Univers n'a pas cessé de baisser entre le Big Bang et l'Inflation.
L'explication physique du déclenchement de cette inflation est fournie par les *Théories de Grande unification* (sigle anglais : GUT) : à des températures suffisamment élevées, telles que l'énergie k_BT des particules atteint ou dépasse 10^{16} GeV (~10^6 joules), les trois interactions forte, faible et électromagnétique sont unifiées.

Lorsque la température baisse en-dessous du seuil d'une énergie de 10^{16} GeV, le plasma de l'Univers subit une transition de phase qui sépare l'interaction forte des deux autres interactions, qui restent unifiées en une interaction électrofaible.



Séparation des forces fondamentales - © Microsoft Bing Creative Commons

11 Références

[0] *Philosophie des sciences, métaphysique du XXIe siècle* de Daniel Martin (http://www.danielmartin.eu/Philo/Metaphysique.pdf) : c'est l'ouvrage dont celui-ci est extrait.

[1] Encyclopédie Universalis 2012
[1a] Article *Aristote 385 environ-322 avant J.-C.* par Pierre Aubenque
[1b] Article *Antiquité – Naissance de la philosophie* par Pierre Aubenque
[1c] Article *Descartes (René) 1596-1650* par Ferdinand Alquié
[1d] Article *Emmanuel Kant (1724-1804)* par Francis Wybrands
[1e] Article *Âme*
[1f] Article *Boscovich*
[1g] Article *Cinétique des fluides (théorie)*
[1h] Article *Spectroscopie*
[1i] Article *Statistique (Mécanique)*
[1j] Article *Démographie*
[1k] Article *Populations animales (dynamique des)*
[1l] Article *Particules élémentaires – Fermions*
[1m] Article *Ondes gravitationnelles*
[1n] Article *Nucléosynthèse*
[1p] Article *Trous noirs*
[1q] Article *Génome – introduction*
[1r] Article *GENOME - Le génome mitochondrial*

[3] Dictionnaire sur PC *Ortolang* du CNRTL (CNRS), comprenant les dictionnaires de l'Académie française jusqu'à la 9ème édition. https://www.cnrtl.fr/definition/

[9] *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* par Isaac Newton (1687)
Traduction française : *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*) - https://www.e-rara.ch/download/pdf/556172?name=Principes%20math%C3%A9matiques%20de%20la%20philosophie%20naturelle

[12] *Dictionnaire des idées de Kant - Vocabulaire de la Critique de la raison pure, des Prolégomènes, du cours Logique et de la Fondation de la métaphysique des mœurs - avec Les Principes (actuels) des mathématiques et la Critique de la philosophie des mathématiques de Kant (complément du cours Logique)* par Daniel Martin
Chez Amazon sous le titre :
Vocabulaire de la Critique de la raison pure - Dictionnaire des idées de Kant

[17] *Méditations métaphysiques* (1641) par Descartes
http://abu.cnam.fr/cgi-bin/donner_html?medit3

[19] *Principes de la philosophie* (1644) par Descartes
https://fr.wikisource.org/wiki/Principes_de_la_philosophie

[20] *Critique de la raison pure* par Emmanuel Kant (1781) – Traduction Alain Renaut - Flammarion, 3e édition, 2006 – Ce gros ouvrage, qui s'étudie à la vitesse moyenne d'une à deux pages par jour, est une base du raisonnement philosophique rationnel.

[21] *Qu’est-ce que les Lumières ?* par Emmanuel Kant (1784)
http://www.danielmartin.eu/Philo/Lumieres.htm

[36] *Eléments* d'Euclide https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k110982q.image

[37] Emmanuel Kant – *Logique* (1800) – Librairie Vrin, 2007

[39] Daniel Martin - *Principes de logique : causalité, homogénéité, raison suffisante, etc*. http://www.danielmartin.eu/Philo/CausalitePPS.pdf

[42] Stanislas Dehaene - *Le code de la conscience* - Odile Jacob, octobre 2014 (427 pages) - Le professeur Dehaene est normalien (mathématiques), docteur en sciences cognitives et titulaire de la chaire de Psychologie cognitive expérimentale au Collège de France.

[43] Daniel Martin - *Conscience et conscience de soi - Eléments de psychologie cognitive* - http://www.danielmartin.eu/Psychologie/Conscience.pdf (2015, 54 pages)

[44] Michel Bitbol - *La conscience a-t-elle une origine ? : Des neurosciences à la pleine conscience : une nouvelle approche de l'esprit*, Flammarion 2014 - 748 pages

[45] André Comte-Sponville et Luc Ferry - *La sagesse des Modernes - Dix questions pour notre temps* – Editions Robert Laffont (1998)

[50] Emmanuel KANT – *Œuvres philosophiques – Tome 1 (1747-1781)*, Gallimard (La Pléiade, 1980)

[51] Michael S. A. Graziano - *Consciousness and the Social Brain* - Oxford University Press, 2013, 268 pages - Compte-rendu de recherches récentes en matière de conscience, cet ouvrage présente une théorie nouvelle sur sa nature et son fonctionnement, ainsi que sur le fonctionnement de la « conscience de l'autre » et de la « conscience de soi ». Directeur d'un laboratoire de psychologie à Princeton University (http://www.princeton.edu/~graziano/), le professeur Graziano nous offre là un texte de neuroscience cognitive extrêmement clair.

[52] Steven Pinker - *How the Mind Works* (Penguin books - 2015, 660 pages)
L'auteur est professeur de psychologie à Harvard et chercheur en psychologie cognitive. Il a enseigné au MIT et à Stanford.

[55] Renée Bouveresse - *Karl Popper ou le rationalisme critique* (Vrin, 1998)

[57] Sir Michael RUTTER - *Genes and Behavior – Nature-Nurture Interplay Explained* (Gènes et comportement – Mécanismes des interactions entre inné et acquis, mars 2008) - Blackwell Publishing. - Citations :

- Page 14 :

  "…l'action des gènes étant indirecte il n'est pas possible de réduire tous les phénomènes au niveau moléculaire. Les organismes sont organisés sous forme de hiérarchie de niveaux. Il y a une chaîne causale précise reliant le produit d'un gène aux actions de ce gène dans l'organisme, mais cette chaîne causale passe

par divers niveaux organisationnels. A chaque niveau, la chaîne est transformée et suit des règles différentes. La complexité commence avec le fait qu'un gène donné quelconque peut avoir plusieurs effets assez différents.

[…] Les protéines produites par l'interprétation des gènes n'agissent pas de manière isolée ; elles participent à la formation de réseaux et structures complexes intégrés à leur tour dans une organisation hiérarchique. De plus, dans le cadre des caractéristiques multifactorielles de l'individu (qui expliquent la grande majorité des comportements intéressants) il y a des interactions avec l'environnement qui peuvent mettre en jeu des corrélations gène-environnement, des influences génétiques sur la sensibilité à l'environnement, et des effets de l'environnement sur l'expression des gènes."

Corrélation (substantif)

- Rapport existant entre deux choses, deux notions, deux faits dont l'un implique l'autre et réciproquement ;
- Relation nécessaire qui s'établit entre une notion et son opposé.

- Page 83

  "…l'influence de ses gènes peut rendre une personne plus ou moins émotive dans son comportement, plus ou moins impulsive dans ses réactions, plus ou moins sociable et extravertie, d'humeur plus ou moins stable ou labile (sujet à changer ou à se transformer), et plus ou moins assurée ou agressive dans ses rapports avec autrui. Tous ces traits de caractère sont quantitatifs plutôt que présents ou absents. Autrement dit, la population ne se subdivise pas en individus agressifs et individus que ne le sont pas ; mais d'une personne à une autre, la probabilité qu'elle soit agressive varie."

- Page 222

  "Le fonctionnement de l'esprit est nécessairement basé sur celui du cerveau, dont la structure et le développement sont façonnés à la fois par les gènes et l'environnement, comme ceux de tout organe. Nous devons à tout prix nous débarrasser de l'idée que certains comportements résultent de causes externes au corps, idée sans fondement biologique. Les effets des gènes sont omniprésents – ce qui n'implique pas, bien entendu, qu'ils prennent le pas sur ceux de l'environnement."

(Fin des citations)

[62] Pierre-Simon de Laplace *Essai philosophique sur les probabilités*, page 2 http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k96200351/f1n294.pdf?download=1

[63] René Thom, mathématicien médaille Fields - Article *Halte au hasard, silence au bruit* publié dans *La querelle du déterminisme* (1990), éditions Gallimard.

[65] Henri Poincaré *L'invention de la topologie – Poincaré* – Collection « Génies des mathématiques » - RBA Coleccionables, Barcelone, Espagne.

[67] INSEE - *Note de conjoncture, décembre 2013 - Reprise poussive - Conjoncture française* - Page 76

[88] Calcul des propositions ou des prédicats
Ces sujets de logique formelle sont abordés dans l'ouvrage [12] au paragraphe *Logique – Compléments modernes et critique des idées de Kant sur ce sujet*.

[96] Article *Cette étonnante Mécanique quantique*, discours d'Alain Aspect du 17/06/2002 - http://www.academie-sciences.fr/pdf/membre/s170602_aspect.pdf .
Deux photons jumeaux, dits « intriqués » car produits ensemble d'une façon qui leur confère un état quantique global et qu'ils partagent un même quantum indécomposable d'énergie, *se comportent comme une particule unique, inséparable* : toute mesure de l'état de l'un correspond toujours à l'état de l'autre, quelle que soit leur distance ; et une action sur l'un d'eux se répercute sur l'autre en un temps nul – donc inférieur au temps qu'il faudrait à la lumière pour l'atteindre.

L'état quantique décrivant les deux photons est unique : il ne s'agit pas de deux états identiques, mais d'un état représentant les deux photons *ensemble* ; c'est ainsi, par exemple, que leurs directions de polarisation opposées sont prises en compte toutes deux en tant qu'ensemble. Lorsqu'une expérience agit sur la polarisation de l'un des photons, elle agit aussi instantanément celle du second photon, même s'il est loin du premier, car la polarisation de l'ensemble doit rester la même, comme son énergie. Si on mesure les polarisations des deux photons, les résultats sont toujours corrélés, conformément aux équations de la Mécanique quantique.

On sait même produire des groupes de plus de 2 photons intriqués, puisqu'en 2004 on a réussi à produire un tel groupe avec 6 photons
(Source: Scientific American - August 2007 pages 78-79, article T*he Gedanken Experimenter- Quantum Weirdness*)

C'est ainsi que des chercheurs ont réussi à transmettre l'un des photons à 144 km de l'autre sans détruire l'intrication avec son jumeau resté au laboratoire.

Par contre, *cette propriété de corrélation préservée lors d'une évolution d'un des photons ne peut servir à transmettre instantanément un message* : le récepteur d'une suite de photons ne peut en déduire quoi que ce soit concernant le message de l'émetteur du fait de la corrélation ; celle-ci se constate après coup, en comparant l'émission à la réception, elle ne permet aucune transmission instantanée d'information. La transmission instantanée de messages n'existe qu'en science-fiction.

L'expérience d'Alain Aspect prouve que pour certains phénomènes :

> **« L'espace n'est pas séparable : il existe des phénomènes pour lesquels les notions de lieux différents ou de taille finie ne s'appliquent pas. »**

C'est là une modification fondamentale du principe de causalité et du déterminisme.

Cette expérience illustre le *Principe de correspondance* selon lequel *certaines équations et certains modèles de raisonnement de la physique quantique sont également valables à l'échelle macroscopique*. Dans l'expérience précédente, tout se passe comme s'il existait une propriété fondamentale de la physique appelée « conservation de l'intrication des photons d'une paire indépendamment de leur

distance », propriété due au fait que ces photons sont décrits par la même fonction d'onde de Mécanique quantique.

Un raisonnement relativiste sur l'indépendance entre deux événements et leur relation de causalité éventuelle montre que :

> **« Deux observateurs différents peuvent voir deux événements *A* et *B* dans l'ordre *A puis B* pour l'un et *B puis A pour l'autre.* »**

[97] Site *Astronomie & Astrophysique - Chat de Schrödinger* : https://www.astronomes.com/le-big-bang/chat-schrodinger/

[98] Température de supraconductivité utilisée dans la technologie mémoire de l'ordinateur quantique Rigetti : environ 1°K (-272.15°C), la température critique de supraconductivité de l'aluminium étant de 1.175°K.
Voir https://www.rigetti.com/solutions.

[109] Article *Is the Universe a Vacuum Fluctuation?* par Edward P. Tryon
Nature 246, pages 396-397 (14/12/1973) - https://www.nature.com/articles/246396a0

Résumé
"The author proposes a big bang model in which our Universe is a fluctuation of the vacuum, in the sense of quantum field theory. The model predicts a Universe which is homogeneous, isotropic and closed, and consists equally of matter and anti-matter. All these predictions are supported by, or consistent with, present observations."

[131] Définitions de la vie utilisées en astrobiologie
https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3005285/
Exemple : *Life is a self-sustaining chemical system capable of Darwinian evolution*

[135] Article *Proceedings of The Royal Society* - 22/07/2007 - Compte-rendu de recherches *DRD4 gene polymorphisms are associated with personality variation in a passerine bird* - http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=1914334

[136] Gènes et participation aux votes

- Compte-rendu de recherches Genetic Variation in Political Participation (05/2008) http://papers.ssrn.com/sol3/Delivery.cfm/SSRN_ID1082665_code646904.pdf?abstractid=1008036&mirid=3
- Scientific American de novembre 2007, article The Genetics of Politics - A study finds that biology strongly governs voter turnout.
- The New York Times - 8 juillet 2014, article How Much Do Our Genes Influence Our Political Beliefs? - http://www.nytimes.com/2014/07/09/opinion/thomas-edsall-how-much-do-our-genes-influence-our-political-beliefs.html?mabReward=RI%3A5&action=click&pgtype=Homepage&region=CColumn&module=Recommendation&src=rechp&WT.nav=RecEngine

[137] *Newsweek* du 04 juin 2007 - Interview de James Dewey Watson, prix Nobel de médecine 1962 pour la découverte de la structure de l'ADN.
A Nobel Winner Pioneers the Personal Genome http://www.newsweek.com/id/34370

Extrait : « If personal-genome sequencing becomes widespread, » he says, «it will make people more compassionate. We'll understand why people can't do certain things,» he continues. «Instead of asking a child to shape up, we'll stop having unrealistic expectations. If a child's genome shows that his awkwardness or inattention or limited intelligence has a genetic basis, we'll want to help rather than be mad. If a child doesn't finish high school, we treat that as a failure, as his fault. But knowing someone's full genetic information will keep us from making him do things he'll fail at. »

[138] Article *Lots of Animals Learn, but Smarter Isn't Better*
The New York Times du 06/05/2008 -
http://www.nytimes.com/2008/05/06/science/06dumb.html?_r=1%26th=%26oref=slogin%26emc=th%26pagewanted=print

[139] La femme ayant deux chromosomes X et l'homme un seul, plusieurs maladies neurologiques sont plus répandues chez l'homme que chez la femme, car celle-ci a moins de chances d'avoir subi des mutations des deux exemplaires d'un même gène. Il y a là un effet réparateur : chez la femme, la présence de l'exemplaire sain d'un gène annule parfois l'effet d'une mutation de l'autre.

[140] Charles Darwin - *De l'origine des espèces* (1859) disponible gratis en français à l'adresse http://www.danielmartin.eu/Arg/Darwin.pdf .

[141] Article *From a Few Genes, Life's Myriad Shapes*
The New York Times du 26/06/2007
http://www.nytimes.com/2007/06/26/science/26devo.html?th=&emc=th&pagewanted=print

[142] Article *Effect of active smoking on the human bronchial epithelium transcriptome - BMC Genomics* du 29/08/2007 - http://www.biomedcentral.com/1471-2164/8/297
Extrait traduit: "Fumer altère de manière irréversible l'expression de certains gènes, notamment parmi ceux qui contribuent à la réparation des chaînes ADN et ceux qui combattent le développement du cancer du poumon. Cette altération se produit chez certains fumeurs en quelques années. Elle est accompagnée d'altérations réversibles et d'altérations partiellement réversibles."

[143] Compte-rendu de recherches *A Changing Portrait of DNA*
Newsweek du 17/12/2007. https://www.newsweek.com/changing-portrait-dna-94585

[145] Logiciel d'application MAPLE 2017 - http://www.maplesoft.com/ - Ce logiciel permet de faire des calculs mathématiques formels comme la dérivation de fonctions ou la résolution de systèmes d'équations différentielles. MAPLE interprète des chaînes de caractères tapées au clavier en y reconnaissant des commandes (ordres d'exécution) et des données, et en affichant à l'écran le résultat de l'exécution de ces commandes avec ces données. C'est ainsi que si on lui demande la dérivée de la fonction ax^2 par rapport à x, MAPLE répond $2ax$.

Autre programme d'application du même genre :
MATLAB - https://fr.mathworks.com/products/matlab.html

[149] Gènes et comportement

- Livre The Science of Good and Evil - Why People Cheat, Gossip, Care, Share, and Follow the Golden Rule" par Michael Shermer (Times Books, 2004). Ce livre est un compte-rendu de recherches récentes sur l'avènement des règles morales.
- Article citant des recherches qui confirment celles de ce livre : "Is 'Do Unto Others' Written Into Our Genes?" - The New York Times du 18/09/2007, http://www.nytimes.com/2007/09/18/science/18mora.html?th=&emc=th&pagewanted=print

[150] Liste de quelque 200 universaux parmi 373 identifiés par Donald E. Brown extraite de l'ouvrage *Human universals*. New York: McGraw-Hill http://condor.depaul.edu/~mfiddler/hyphen/humunivers.htm.

[151] Universaux :

- Article The Moral Instinct - The New York Times du 13/01/2008 http://www.nytimes.com/2008/01/13/magazine/13Psychology-t.html?_r=1&th=&oref=slogin&emc=th&pagewanted=print.
- [149] page 60.

[152] Déclaration universelle des droits de l'homme des Nations unies http://www.ohchr.org/EN/UDHR/Documents/UDHR_Translations/frn.pdf.

[177] Edward N. Lorenz - *The Essence of Chaos* - University of Washington Press (1993)

[178] Article *Self-Organization in the Physico-Chemical and Life Sciences* (29/03/1996) http://pubman.mpdl.mpg.de/pubman/faces/viewItemFullPage.jsp?itemId=escidoc:601715
Abstract: Experimental and theoretical analysis have by now established the existence of self-organization, from the molecular (e.g. self-assembly) to the macroscopic level (e.g. chemical oscillations and pattern formation). There is increasing awareness that self-organization is likely to provide the key to understanding the marked polymorphism of matter in the mesoscopic and macroscopic levels as well as many phenomena in the life sciences such as evolutionary processes, the development of patterns and the principles underlying the brain function. This publication concentrates on phenomena observed in the life sciences that take place far from equilibrium. Also included are oscillating chemical reactions because they provide a well characterized paradigm for self-organization of direct relevance to biology. Furthermore, some specific ordering processes operating near chemical equilibrium, such as molecular recognition, are included in the essay because they are a prerequisite for the biological function.

[183] Daniel Kahneman, prix Nobel d'économie 2002 - *Thinking, Fast and Slow* - Penguin Press (2012) - L'auteur reproche à la plupart des gens de croire que ce qu'ils savent ou voient est tout ce qui existe (WYSIATI : What You See Is All There Is) en oubliant de chercher au-delà.

[184] Jean TIROLE, prix Nobel d'économie 2014 - *Economie du bien commun* – Editions PUF (2016)

Cet ouvrage présente les problèmes actuels d'économie (chômage, déficit, inégalités, fiscalité, marchés…) dans un style remarquablement facile et agréable à lire. La principale difficulté des décisions économiques venant aujourd'hui d'une information insuffisante des décideurs, il présente ce sujet dans l'extrait ci-dessous.

(Citation de la page 32)

Nous croyons ce que nous voulons croire,
nous voyons ce que nous voulons voir

« Nous croyons souvent ce que nous voulons croire, pas ce que l'évidence nous conduirait à croire. Comme l'ont souligné des penseurs aussi divers que Platon, Adam Smith ou le grand psychologue américain du XIXe siècle William James, la formation et la révision de nos croyances servent aussi à conforter l'image que nous voulons avoir de nous-même ou du monde qui nous entoure. Et ces croyances, agrégées au niveau d'un pays, déterminent les politiques économiques, sociales, scientifiques ou géopolitiques.

Non seulement nous subissons des biais cognitifs, mais qui plus est, il arrive assez fréquemment que nous les recherchions. Nous interprétons les faits au prisme de nos croyances, nous lisons les journaux et recherchons la compagnie de personnes qui nous confortent dans nos croyances, et donc nous nous entêtons dans ces croyances, justes ou erronées. Confrontant des individus à des preuves scientifiques du facteur anthropique (c'est-à-dire lié à l'influence de l'homme) dans le réchauffement climatique, Dan Kahan, professeur de droit à l'université de Yale, observa que les Américains qui votent démocrate ressortent encore plus convaincus de la nécessité d'agir contre le réchauffement climatique, tandis que, confrontés aux mêmes données, de nombreux républicains se voyaient confortés dans leur posture climatosceptique[1]. Plus étonnant encore, ce n'est pas une question d'instruction ou d'intelligence : statistiquement, le refus de faire face à l'évidence est au moins aussi ancré chez les républicains disposant d'une éducation supérieure que chez les républicains moins instruits ! Personne n'est donc à l'abri de ce phénomène. »

1 - Dans son article «*Ideology, Motivated Reasoning, and Cognitive Reflection*, *Judgment and Decision Making»,* 2013, n° 8, page 407-424. Plus précisément, Kahan montre que les capacités de calcul et d'analyse réflexive n'augmentent pas la qualité de la révision des croyances sur le facteur anthropique. Rappelons qu'en 2010 seulement 38% des [électeurs] républicains acceptaient l'idée d'un réchauffement climatique depuis l'ère préindustrielle et seulement 18% y voyaient un facteur anthropique (c'est-à-dire une cause humaine).
(Fin de citation)

[190] Jean-Paul Sartre - *L'Etre et le néant* - Gallimard (1943)

[191] Gregory Berns - *Satisfaction: The Science of Finding True Fulfillment* – chez Henry Holt & Company, New York (2005)

[200] Article *Du monde quantique au monde macroscopique : la décohérence prise sur le fait* (CNRS - 15/12/1996) - http://casar.pagesperso-orange.fr/Du%20monde%20quantique%20au%20monde%20macroscopique%20%20la%20decoherence%20prise%20sur%20le%20fait.htm.

[201] (Bible) Epitre de Paul aux Romains 11.33
"O profondeur de la richesse, de la sagesse et de la science de Dieu ! Que ses jugements sont insondables, et ses voies incompréhensibles !"

[203-1] Livre *Our Mathematical Universe* par Max Tegmark - (Alfred A. Knopf, New York, 2014).

[267] Article *How many genes are in a genome?* par Ron Milo et Rob Philips
http://book.bionumbers.org/how-many-genes-are-in-a-genome/
extrait du livre *Cell Biology by the Numbers* (décembre 2015).

[268] Source : *Encyclopédie Universalis* [1q]
La notion de cellule s'applique aux systèmes où coexistent deux types différents d'acides nucléiques liés à des structures protéiques [l'ADN et l'ARN]. Dans ce cas, c'est l'ADN d'un chromosome qui va être *le dépositaire* de l'information génétique, tandis que l'ARN interviendra dans *l'expression* de cette information, en fait sa traduction en protéines au niveau de ribosomes, particules cytoplasmiques chargées d'ARN. L'ARN agit comme un interrupteur marche-arrêt pour autoriser ou inhiber l'expression de chaque gène. Il peut agir comme un enzyme en catalysant des réactions.

Comme l'ADN, l'ARN est composé de nucléotides, mais c'est une classe de molécules dont la forme est tantôt un brin replié (comme une protéine), tantôt une double hélice comme l'ADN.

[272-4] Carlo Rovelli – *Par-delà le visible : La réalité du monde physique et la gravité quantique* (2015)

[301] *Relational Quantum Mechanics* (octobre 2019)
The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Winter 2019 Edition)
https://plato.stanford.edu/archives/win2019/entries/qm-relational/

[302] Article *Information converted to energy – physicsworld*, 19/11/2010
https://physicsworld.com/a/information-converted-to-energy/ - Extrait traduit :

Une expérience de pensée proposée par James Clerk Maxwell en 1871
Maxwell envisageait un gaz initialement à température uniforme contenu dans une boîte séparée en deux compartiments, avec un minuscule être intelligent, appelé plus tard "le démon de Maxwell", contrôlant un obturateur entre les deux compartiments. Connaissant la vitesse de chaque molécule dans la boîte, le démon peut en principe contrôler l'ouverture et la fermeture de l'obturateur pour permettre l'accumulation de molécules plus rapides dans un compartiment et plus lentes dans l'autre. De cette manière, le démon peut diminuer l'entropie à l'intérieur de la boîte sans transférer d'énergie directement aux particules, en contradiction apparente avec le second principe de la thermodynamique.

Parmi les nombreuses réponses à cette énigme figurait celle de Leó Szilárd en 1929, qui soutenait que le démon devait consommer de l'énergie pour mesurer les vitesses des particules, et que cette consommation conduirait à une augmentation de l'entropie du système.

Szilárd a même formulé une équivalence entre énergie et information, calculant que $k_B T ln2$ (soit environ 0,69 $k_B T$) est à la fois la quantité minimale de travail nécessaire pour stocker un bit d'information binaire et le maximum qui est libéré lorsque ce bit est effacé, où k_B est la constante de Boltzmann k_B = 1.38066 **.**10^{-23} joule par degré Kelvin) et T est la température absolue du support de stockage. »

[313] Livre *La révolution inachevée d'Einstein – Au-delà du quantique* par Lee Smolin (Dunod 2019). C'est un excellent ouvrage, didactique et passionnant à lire. C'est aussi un livre à thèse défendant le réalisme naïf d'Einstein et de Smolin lui-même contre l'interprétation antiphilosophique de Copenhague défendue par Bohr et Heisenberg et résumant des pistes de recherche dans ce domaine.

[316] Livre *Epigenetics – How Environment Shapes Our Genes*
par Richard C. Francis W. W. Norton & Company, New York, London.

[317] Livre *The Genetics Revolution – How Modern Biology is Rewriting Our Understanding of Genetics, Disease and Inheritance* par Nessa Carey – Icon Books, London

[318] Article *Study shows neutrinos can exhibit quantum superposition states* – https://watchers.news/2016/07/21/study-shows-neutrinos-can-exhibit-quantum-superposition-states/ in *The Watchers* - Thursday, July 21, 2016

[B1] Albert Einstein – *La relativité – Théorie de la Relativité restreinte et générale (1916) – La Relativité et le problème de l'espace* – Traduit d'après la quatorzième édition allemande - Petite Bibliothèque Payot (2001)

[B12] Livre *Critique de la raison pure* (1781 et 1787) par Emmanuel Kant
(traduction Alain Renaut - Flammarion, 3e édition, 2006 - 749 pages – 9.30€).

[B67] Livre *The Emperor's New Mind* par Roger Penrose, mathématicien et physicien anglais célèbre pour ses travaux sur les trous noirs en collaboration avec Stephen Hawking (1989 - Oxford University Press)

[B123] Article IS WAVE PROPAGATION COMPUTABLE OR CAN WAVE COMPUTERS BEAT THE TURING MACHINE?
http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract;jsessionid=64E637A7273855F16C9DA940957B4681.tomcat1?fromPage=online&aid=113911 - Citation :

> *"En 1983 Pour-El et Richards ont défini une onde tridimensionnelle u(t,x) dont l'amplitude u(0,x) à l'instant t=0 est calculable et l'amplitude u(1,x) à l'instant t=1 est continue mais non calculable."*

Article *An ordinary differential equation defined by a computable function whose maximal interval of existence is non-computable*
https://www.researchgate.net/publication/251299818_An_ordinary_differential_equation_defined_by_a_computable_function_whose_maximal_interval_of_existence_is_non-computable

[B268] Article *The Computational Theory of Mind* par Michael Rescorla (Stanford)
https://plato.stanford.edu/entries/computational-mind/